



João Maria Alarcão Campelo Ribeiro

Aplicação de ultrassons na caracterização de estruturas de betão

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientadora: Doutora Maria Luísa Braga Farinha

Co-orientador: Professor Doutor João Paulo Bilé Serra

Presidente: Prof. Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra
Arguente: Prof. Doutora Ana Paula Ferreira Pinto
Vogais: Prof. Doutor João Paulo Bilé Serra
Doutora Maria Luísa Braga Farinha



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

março de 2013



João Maria Alarcão Campelo Ribeiro

Aplicação de ultrassons na caracterização de estruturas de betão

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil no Ramo de Estruturas pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa no âmbito do protocolo de cooperação entre a FCT/UNL e o LNEC



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

março 2013

Aplicação de ultrassons na caracterização de estruturas de betão

“Copyright” João Maria Alarcão Campelo Ribeiro, da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Doutora Maria Luísa Braga Farinha, por toda a disponibilidade, boa disposição e organização contagiantes, pela bibliografia que me disponibilizou e pelo acompanhamento na atividade experimental.

Agradeço ao meu co-orientador, Professor Doutor João Paulo Bilé Serra, pelos conhecimentos transmitidos, pela sua disponibilidade e paciência, pela confiança depositada e pelo encorajamento e amizade.

Ao Presidente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Investigador Carlos Pina, à Diretora do Departamento de Geotecnia (DG) do LNEC, Doutora Laura Caldeira, e ao Diretor do Departamento de Barragens de Betão (DBB), Doutor José Vieira de Lemos, por garantirem todos os meios para o desenvolvimento desta tese de mestrado, no âmbito do convénio de cooperação entre a FCT/UNL e o LNEC.

Aos técnicos Francisco Morganho e Tiago Henrique pela enorme ajuda e companhia na realização dos ensaios experimentais e ao técnico Fernando Marques por toda a disponibilidade e ajuda no transporte e corte dos provetes.

Ao Núcleo de Betões do Departamento de Materiais (DM) do LNEC, pelo fornecimento dos provetes de betão utilizados nos ensaios de ultrassons, e pela realização dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade em carotes cilíndricas extraídas dos provetes. Agradeço em especial ao técnico João Balsinha pelo tempo dedicado ao planeamento e preparação destes ensaios.

Agradeço também ao Técnico Daniel Filipe do DG pela realização dos ensaios de determinação do coeficiente de Poisson nos provetes cilíndricos.

À Maria do Carmo por toda a amizade e apoio incondicional ao longo de todo este trabalho.

RESUMO

Os ensaios não destrutivos são cada vez mais utilizados na caracterização de estruturas. A precisão dos resultados destes ensaios é importante na verificação da conservação e na reabilitação de estruturas. Neste trabalho abordam-se os ensaios de ultrassons que são usualmente utilizados na caracterização de estruturas em betão, nomeadamente para obter informações sobre a sua homogeneidade, o seu estado de conservação e a existência de defeitos.

Os métodos de análise de propagação de ondas ultrassónicas são de fácil aplicação e têm vantagens decorrentes dos seus custos e resultados fornecidos. São apresentados com particular detalhe os métodos que permitem estimar a profundidade de fendas superficiais em estruturas de betão utilizando a análise da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas. No âmbito desta tese inclui-se a avaliação da aplicabilidade dos métodos de estimativa da profundidade de fendas superficiais em estruturas de betão. Para tal, este trabalho conjuga atividades experimentais de modelação física com atividades de modelação numérica desses ensaios.

Na componente experimental foram ensaiados quatro provetes de betão simples. Cada provete foi avaliado quanto à homogeneidade, ao estado de conservação e à presença de defeitos. Nos provetes ensaiados foram deixadas fendas superficiais, para permitir a verificação da aplicabilidade dos métodos de cálculo de profundidade de fendas estudados. Adicionalmente, foi extraída uma carote de cada um dos provetes para ensaios de compressão simples para determinação do módulo de elasticidade, sendo os valores experimentais comparados com os obtidos através dos ensaios de ultrassons.

Com o objetivo de compreender melhor as trajetórias de propagação de ondas, desenvolveu-se um modelo numérico que permitiu simular as condições de ensaio. Os resultados numéricos obtidos foram comparados com os resultados experimentais. Foi possível formular conclusões sobre as análises experimentais efetuadas, nomeadamente, sobre a precisão dos métodos utilizados para estimar a profundidade de fendas e as condições que influenciam a sua aplicação.

Palavras-chave: caracterização de estruturas, ensaios de ultrassons, modelação numérica, betão, profundidade de fendas, diferenças finitas.

ABSTRACT

Non Destructive tests are increasingly being used in order to characterize structures. The accuracy of these techniques is a very important issue in both inspection and rehabilitation of structures. In this study ultrasonic velocity tests that are currently used in the characterization of concrete structures are addressed, namely those carried out in order to obtain information regarding structures' homogeneity, state of repair and the presence of any defects.

The ultrasonic pulse velocity tests are easily performed, with a small associated cost and can offer accurate results. Methods that allow the estimation of the depth of superficial cracks using ultrasonic waves are presented in detail. The scope of this thesis includes the assessment of the possibility of applying these methods for crack depth evaluation. For this, the study includes both experimental and numerical modeling of the tests carried out.

The experimental part of this study involved tests on four concrete specimens. Each concrete specimen was evaluated regarding homogeneity, degradation and flaw detection. Cracks with pre-established depths were purposely done in each specimen in order to verify the applicability of each of the crack depth estimating methods addressed here. Additionally, compressive tests were carried out in order to obtain the elastic modulus of each specimen and the results obtained were compared with those obtained using ultrasonic tests.

With the aim of improving knowledge about the ultrasonic wave path, a numerical method was developed, which allowed test conditions to be simulated. Numerical results were compared with the experimental results, in order to improve the experimental procedures. Some conclusions were drawn about the experimental analysis, regarding both the accuracy of the tested methods for crack depth evaluation and the factors that influence their results.

Keywords: structural characterization, ultrasonic tests, numerical modeling, concrete, crack depth, finite differences.

ÍNDICE

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Enquadramento do tema | 1 |
| 1.2 | Motivação..... | 3 |
| 1.3 | Objetivos | 3 |
| 1.4 | Organização da tese..... | 4 |
| 2 | PROPAGAÇÃO DE ONDAS SONORAS | 5 |
| 2.1 | Ondas sonoras | 5 |
| 2.2 | Propagação de ondas mecânicas | 6 |
| 2.3 | Propagação das ondas através de uma interface entre dois meios diferentes | 8 |
| 3 | UTILIZAÇÃO DE ULTRASSONS NA CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS..... | 15 |
| 3.1 | Ensaio de ultrassons..... | 15 |
| 3.2 | Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas..... | 16 |
| 3.3 | Amplitude de propagação de ondas ultrassónicas..... | 17 |
| 3.4 | Fatores que influenciam os resultados dos ensaios de ultrassons em betão..... | 17 |
| 3.4.1 | Temperatura | 17 |
| 3.4.2 | Estado de tensão na estrutura | 18 |
| 3.4.3 | Comprimento do percurso de onda | 18 |
| 3.4.4 | Frequência dos emissores de ondas ultrassónicas | 19 |
| 3.4.5 | Humidade | 20 |
| 3.4.6 | Presença de armaduras | 20 |
| 3.4.7 | Composição do betão..... | 21 |
| 3.4.8 | Forma e dimensão do elemento estrutural..... | 22 |
| 3.5 | Modos de geração e transmissão das ondas ultrassónicas..... | 22 |
| 3.5.1 | Equipamentos de geração e de receção de ondas ultrassónicas..... | 22 |
| 3.5.2 | Posicionamento dos transdutores | 23 |
| 3.6 | Métodos de cálculo de profundidade de fendas..... | 24 |
| 3.6.1 | Método proposto na norma British Standard “BS” (1986)..... | 24 |
| 3.6.2 | Método de Bungey (1989) | 25 |
| 3.6.3 | Método T (1972) | 27 |
| 3.6.4 | Versão simplificada do Método T – “Método L” | 29 |
| 3.6.5 | Método sugerido por Pinto, Medeiros e Padaratz (2007) | 30 |
| 4 | ENSAIOS COM ULTRASSONS EM PROVETES DE BETÃO | 33 |
| 4.1 | Resumo da atividade experimental | 33 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2 | Equipamento de ensaio | 35 |
| 4.3 | Características dos provetes de betão ensaiados | 36 |
| 4.4 | Ensaio de propagação direta de ultrassons para a caracterização dos provetes | 39 |
| 4.4.1 | Caracterização dos provetes quanto à presença de defeitos recorrendo à velocidade de propagação de ondas ultrassónicas | 41 |
| 4.4.2 | Verificação da homogeneidade do betão | 45 |
| 4.5 | Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dos provetes | 46 |
| 4.5.1 | Determinação experimental do módulo de elasticidade através de ensaios de compressão..... | 46 |
| 4.5.2 | Determinação do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade dinâmico através de ensaios de ultrassons | 48 |
| 4.5.3 | Comparação do módulo de elasticidade obtido com os diversos ensaios | 50 |
| 4.6 | Avaliação da profundidade de fendas através de ensaios de propagação indiretos | 51 |
| 4.6.1 | Estimativa da profundidade de fendas..... | 53 |
| 4.6.1.1 | Apresentação dos resultados obtidos com o método de Bungey | 54 |
| 4.6.1.2 | Apresentação dos resultados obtidos com o Método T e com o Método L | 55 |
| 4.6.1.3 | Apresentação dos resultados obtidos com o método de Pinto, Medeiros e Padaratz (MPMP) | 61 |
| 4.7 | Conclusões do capítulo experimental | 65 |
| 5 | MODELAÇÃO NUMÉRICA DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS | 69 |
| 5.1 | Programa de Modelação Numérica | 69 |
| 5.1.1 | Modelo Numérico de propagação de ondas ultrassónicas..... | 69 |
| 5.1.1.1 | Equações do modelo | 69 |
| 5.1.1.2 | Discretização do modelo | 70 |
| 5.1.1.1 | Condições de fronteira..... | 72 |
| 5.1.1.2 | Geração de onda ultrassónica..... | 72 |
| 5.1.2 | Funcionamento do Software | 73 |
| 5.2 | Modelação numérica dum provete de betão..... | 73 |
| 5.3 | Critérios de determinação dos tempos de propagação | 76 |
| 5.4 | Simulação das leituras diretas do provete V4 e comparação com os resultados experimentais..... | 81 |
| 5.5 | Simulação das leituras indiretas do provete V4 e comparação com os resultados experimentais..... | 85 |
| 5.5.1 | Apresentação dos resultados do método de Bungey obtidos com a simulação numérica e comparação com os resultados experimentais..... | 89 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.5.2 | Apresentação dos resultados do Método T e Método L obtidos com a simulação numérica e comparação com os resultados experimentais | 89 |
| 5.5.3 | Apresentação dos resultados do método sugerido por Pinto, Medeiros e Padaratz (MPMP) para a simulação numérica e comparação com os resultados experimentais | 91 |
| 5.5.4 | Resumo das estimativas da profundidade de fendas obtidas com o SimSonic | 94 |
| 5.6 | Conclusões do capítulo de modelação numérica..... | 98 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 101 |
| 6.1 | Aspetos relevantes dos estudos efetuados | 101 |
| 6.2 | Recomendação para estudos futuros..... | 102 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 103 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Esquema de relação entre partículas de um material elástico [6] | 5 |
| Figura 2.2 - Tipos de ondas sonoras [8]..... | 6 |
| Figura 2.3 - Sensibilidade da velocidade de propagação c_L ao coeficiente de Poisson | 8 |
| Figura 2.4 - Decomposição de uma onda longitudinal numa interface entre dois meios elásticos [11] | 9 |
| Figura 2.5 - Esquema da barra de Hopkinson | 11 |
| Figura 3.1 - Efeito do percurso de propagação de onda na velocidade de propagação a curta distância entre emissor e recetor de ondas ultrassónicas [7]..... | 19 |
| Figura 3.2 - Direção de propagação paralela à direção das armaduras [7]..... | 21 |
| Figura 3.3 - Esquema de funcionamento de um aparelho de ultrassons [17] | 23 |
| Figura 3.4 - Modos de disposição dos transdutores em ensaios de ultrassons | 24 |
| Figura 3.5 - Modelo proposto pela norma BS EN12504-4 [29] | 25 |
| Figura 3.6 - Modelo Proposto por Bungey (1989) adaptado de [7]..... | 26 |
| Figura 3.7 - Representação gráfica genérica para o Método T e para a versão simplificada do Método T [16]..... | 27 |
| Figura 3.8 - Modelo geométrico para o Método T | 27 |
| Figura 3.9 - Método de afastamento sucessivo equidistante [22]..... | 30 |
| Figura 3.10 – Método de afastamento sucessivo linear [22]..... | 30 |
| Figura 3.11 - Representação gráfica da análise dos resultados do método de afastamento sucessivo equidistante (adaptado de [22]) | 31 |
| Figura 3.12 - Representação gráfica da análise dos resultados do método de afastamento sucessivo linear (adaptado de [22]) | 32 |
| Figura 4.1 – Equipamento PUNDIT utilizado nos ensaios | 35 |
| Figura 4.2 - Provetes V1 (a) e V2 (b) | 37 |
| Figura 4.3 - Provetes V3 (a) e V4 (b) | 37 |
| Figura 4.4 - Dimensões genéricas dos provetes: V1e V2 (a); V3 e V4 (b) | 38 |
| Figura 4.5 - Numeração das quadrículas da malha na face do transdutor-emissor | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.6 – Isolinhas das velocidades de propagação direta das ondas ultrassónicas nos provetes V1 e V2..... | 42 |
| Figura 4.7 - Isolinhas das velocidades de propagação das ondas ultrassónicas nos provetes V3 e V4..... | 43 |
| Figura 4.8 – Velocidade de propagação nas leituras semi-diretas no provete V3 (direção x) | 43 |
| Figura 4.9 – Velocidade de propagação nas leituras semi-diretas no provete V4 (direção x) | 43 |
| Figura 4.10 - Isolinhas das velocidades de propagação direta das ondas ultrassónicas nos provetes V3.1 e V4.1 | 44 |
| Figura 4.11 - Velocidade de propagação nas leituras semi-diretas no provete V3.1 para transdutores de 24 kHz (direção x) | 44 |
| Figura 4.12 - Velocidade de propagação nas leituras semi-diretas no provete V4.1 para transdutores de 24 kHz (direção x) | 45 |
| Figura 4.13 - Ensaio à compressão para determinação experimental do módulo de elasticidade dos provetes..... | 47 |
| Figura 4.14 - Representação do sinal típico da chegada das ondas P e das ondas S na determinação experimental do coeficiente de Poisson (adaptado de [31]) | 49 |
| Figura 4.15 - Ensaio de determinação do coeficiente de Poisson através de ondas P e S | 50 |
| Figura 4.16 - Disposição dos transdutores pelo modo A e modo B aplicados às fendas próximas da extremidade dos provetes | 52 |
| Figura 4.17 - Disposição dos transdutores para aplicação do método de Bungey e do modelo de afastamento sucessivo equidistante aplicado às fendas centrais dos provetes V3, V3.1, V4 e V4.1 | 53 |
| Figura 4.18 - Alinhamentos de leituras indiretas | 53 |
| Figura 4.19 - Estimativas da profundidade das fendas obtidas com o método de Bungey | 55 |
| Figura 4.20 - Representação gráfica do Método T para o alinhamento 2 do provete V4, modo A, (fenda de 2,5 cm de profundidade)..... | 57 |
| Figura 4.21 - Estimativas da profundidade das fendas obtidas com o Método T..... | 59 |
| Figura 4.22 - Estimativas da profundidade das fendas obtidas com o Método L..... | 60 |
| Figura 4.23 - Representação gráfica do método de afastamento sucessivo linear (MPMP) para o alinhamento 2 do provete V4 (fenda com 2,5 cm de profundidade)..... | 62 |
| Figura 4.24 - Representação gráfica do Método de afastamento sucessivo equidistante (MPMP) para o alinhamento 2 do provete V4 (fenda de 5 cm de profundidade) | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.25 - Estimativas da profundidade das fendas obtidas com o método de afastamento sucessivo equidistante | 64 |
| Figura 4.26 - Estimativas da profundidade das fendas obtidas com o método de afastamento sucessivo linear | 65 |
| Figura 5.1 - Algoritmo de "Leapfrog" numa malha temporal do SimSonic (2D) [34]..... | 71 |
| Figura 5.2 - Componentes de cálculo numa malha espacial [34] | 71 |
| Figura 5.3 - Dimensões da malha de simulação e condições de fronteiras consideradas | 74 |
| Figura 5.4 - Sinal emitido introduzido no SimSonic..... | 75 |
| Figura 5.5 - Sinal emitido, sinal recebido e legenda dos critérios utilizados no cálculo do tempo de propagação (adaptado de Viggiani [35]) | 76 |
| Figura 5.6 – Esquema da simulação para leituras de tempos de propagação sem fendas no provete V4..... | 78 |
| Figura 5.7 - Divisão dos alinhamentos do modelo tridimensional em zonas de comparação com o modelo bidimensional | 78 |
| Figura 5.8 – Representação da propagação T22 gerada no emissor 3, na simulação do provete V4 sem a presença das fendas | 81 |
| Figura 5.9 - Meio de simulação do provete V4 com as respetivas fendas..... | 82 |
| Figura 5.10 - Registo do sinal emitido e do sinal recebido na leitura direta entre o emissor 3 e o recetor 3 do provete V4 | 82 |
| Figura 5.11 – Representação da propagação T22 gerada no emissor 1, na simulação do provete V4..... | 83 |
| Figura 5.12 - Representação da propagação T22 gerada no emissor 4, na simulação do provete V4..... | 84 |
| Figura 5.13 - Representação da propagação T22 gerada no emissor 1, na simulação do provete V4.1..... | 85 |
| Figura 5.14 – Propagação de ondas ultrassónicas numa leitura indireta | 86 |
| Figura 5.15 - Disposição dos transdutores pontuais e dos transdutores com 5 cm de diâmetro na leitura de propagação indireta | 87 |
| Figura 5.16 – Representação gráfica dos tempos de propagação usados no cálculo da estimativa de profundidade de fenda para o Método T e para o Método L no provete V4, modo A..... | 91 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.17 - Representação gráfica dos resultados na aplicação do método de afastamento sucessivo equidistante para a fenda central (5 cm) do provete V4 | 93 |
| Figura 5.18 - Representação gráfica dos resultados na aplicação do método de afastamento sucessivo linear para a fenda de 2,5 cm situada próxima de uma das extremidades do provete V4 | 94 |
| Figura 5.19 - Resumo das estimativas de profundidade de fendas obtidas experimentalmente e obtidas pela simulação no SimSonic com o método de Bungey | 96 |
| Figura 5.20 - Resumo das estimativas de profundidade de fendas obtidas experimentalmente e obtidas pela simulação no SimSonic com o método de afastamento sucessivo equidistante | 96 |
| Figura 5.21 - Resumo das estimativas de profundidade de fendas obtidas experimentalmente e obtidas pela simulação no SimSonic com o método de afastamento sucessivo linear..... | 97 |
| Figura 5.22 - Resumo das estimativas de profundidade de fendas obtidas experimentalmente e obtidas pela simulação no SimSonic com o Método T | 97 |
| Figura 5.23 - Resumo das estimativas de profundidade de fendas obtidas experimentalmente e obtidas pela simulação no SimSonic com o Método L | 98 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1.1 - Técnicas não destrutivas utilizadas na caracterização de estruturas de betão (adaptado de IAEA 2005 [2]) | 3 |
| Tabela 3.1 - Correspondência entre a qualidade do betão e a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas [18] | 16 |
| Tabela 3.2- Fatores de correção da velocidade dos ultrassons no betão em função da temperatura [26]..... | 18 |
| Tabela 3.3 - Efeitos da dimensão do provete na propagação de ondas [29] | 22 |
| Tabela 4.1 - Composição teórica do betão nos provetes V3 e V4 | 38 |
| Tabela 4.2 - Características dos provetes de betão..... | 38 |
| Tabela 4.3 – Número de leituras diretas e semi-diretas realizadas em cada provete, segundo as direções x e z, e valores mínimo, máximo, média, desvio padrão e coeficiente de variação da velocidade de propagação | 40 |
| Tabela 4.4 - Número de leituras diretas e semi-diretas realizadas em cada provete, valores mínimo, máximo, média, desvio padrão e coeficiente de variação da velocidade de propagação | 45 |
| Tabela 4.5 - Módulo de elasticidade experimental em ensaio de compressão | 48 |
| Tabela 4.6 - Valores experimentais do coeficiente de Poisson determinado através de ensaio de propagação de ondas S e P..... | 49 |
| Tabela 4.7 - Valores do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes | 50 |
| Tabela 4.8 - Comparação entre os valores experimentais do módulo de elasticidade e do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes | 51 |
| Tabela 4.9 - Resumo dos métodos aplicados a cada provete | 53 |
| Tabela 4.10 - Intervalo de cores para os valores do módulo do erro..... | 53 |
| Tabela 4.11 - Valores dos intervalos para assegurar a melhor precisão do método de Bungey na estimativa de profundidade de fendas..... | 54 |
| Tabela 4.12 - Resultados das estimativas da profundidade de fendas calculadas pelo método de Bungey | 54 |
| Tabela 4.13 - Valores dos tempos de propagação no provete V4, Método T - modo A..... | 56 |
| Tabela 4.14 – Comparação de profundidade real das fendas com os valores estimados recorrendo ao Método T (modos A e B) | 58 |

| | |
|--|----|
| Tabela 4.15 - Valores do erro percentual da estimativa da profundidade de fendas recorrendo ao Método T e usando os modos A e B em cada alinhamento | 58 |
| Tabela 4.16 - Comparação da profundidade real das fendas com os valores estimados recorrendo ao Método L (modos A e B referidos no subcapítulo 4.6.1) | 59 |
| Tabela 4.17 - Valores do erro percentual da estimativa da profundidade de fendas recorrendo ao Método L usando os modelos A e B em cada alinhamento..... | 60 |
| Tabela 4.18 - Tempos de propagação registados e valores utilizados na elaboração do gráfico correspondente ao método de afastamento sucessivo linear (MPMP) | 61 |
| Tabela 4.19 - Tempos de propagação registados e valores utilizados na elaboração do gráfico correspondente ao método de afastamento sucessivo equidistante (MPMP)..... | 62 |
| Tabela 4.20 - Estimativa da profundidade das fendas localizadas no centro do provete, usando o método de afastamento sucessivo equidistante (MPMP), e valor do erro percentual..... | 63 |
| Tabela 4.21 - Estimativa da profundidade de fendas, localizadas a 20 cm da extremidade do provete, usando o método de afastamento sucessivo linear (MPMP), e valor do erro percentual..... | 64 |
| Tabela 5.1 - Sistema de unidades utilizado na simulação [34]..... | 74 |
| Tabela 5.2 - Parâmetros adotados na simulação do provete V4 e da fenda | 74 |
| Tabela 5.3 - Parâmetros principais da simulação..... | 76 |
| Tabela 5.4 - Tempos de propagação obtidos pelo SimSonic considerando o critério de deteção visual da primeira perturbação da onda | 79 |
| Tabela 5.5 - Velocidades de propagação obtidas pelo SimSonic considerando o critério de deteção visual da primeira perturbação da onda | 79 |
| Tabela 5.6 - Tempos de propagação obtidos pelo SimSonic considerando o critério de deteção visual do primeiro pico de amplitude | 79 |
| Tabela 5.7 - Velocidades de propagação obtidas pelo SimSonic, considerando o critério de deteção visual do primeiro pico de amplitude | 79 |
| Tabela 5.8 - Tempos de propagação obtidos pelo SimSonic, considerando o critério de deteção do segundo pico de amplitude | 80 |
| Tabela 5.9 - Velocidades de propagação obtidas pelo SimSonic, considerando o critério de deteção do segundo pico de amplitude | 80 |
| Tabela 5.10 - Tempos de propagação da simulação numérica e das leituras experimentais dos ensaios de ultrassons no provete V4 | 82 |

| | |
|---|----|
| Tabela 5.11 – Desvio relativo entre os valores na simulação e os valores experimentais para o provete V4..... | 83 |
| Tabela 5.12 - Tempos de propagação da simulação numérica e das leituras experimentais dos ensaios de ultrassons no provete V4.1..... | 85 |
| Tabela 5.13 - Desvio relativo entre os valores na simulação e os valores experimentais para o provete V4.1..... | 85 |
| Tabela 5.14 - Tempos de propagação calculados no SimSonic e velocidades de propagação com a disposição de transdutores da Figura 5.15..... | 87 |
| Tabela 5.15 - Comparação entre os valores experimentais dos tempos sem fenda das leituras indiretas do provete V4 com os valores numéricos obtidos com transdutores pontuais e transdutores com 5 cm de diâmetro | 88 |
| Tabela 5.16 - Comparação entre os valores experimentais dos tempos com fenda das leituras indiretas do provete V4 com os valores numéricos obtidos com transdutores pontuais e transdutores com 5 cm de diâmetro | 88 |
| Tabela 5.17 - Estimativa de profundidade de fendas obtidas experimentalmente e obtidas pela simulação no SimSonic..... | 89 |
| Tabela 5.18 - Tempos de propagação obtidos experimentalmente e pelo SimSonic no Método T e Método L..... | 90 |
| Tabela 5.19 - Valores de cálculo da estimativa de profundidade da fenda de 2,5 cm do modo A do Método T e Método L | 91 |
| Tabela 5.20 - Tempos de propagação experimentais e simulados, na aplicação do método de afastamento sucessivo equidistante para a fenda central (5 cm) do provete V4..... | 92 |
| Tabela 5.21 - Tempos de propagação experimentais e simulados na aplicação do método de afastamento sucessivo linear para a fenda de 2,5 cm situada próxima de uma das extremidades do provete V4..... | 93 |
| Tabela 5.22 – Comparação entre os resultados obtidos pelo SimSonic na estimativa de profundidade de fendas recorrendo aos diversos métodos e comparação com as estimativas obtidas experimentalmente para o provete V4..... | 94 |
| Tabela 5.23 - Estimativas de profundidade da fenda central com diferentes profundidades simuladas no SimSonic..... | 95 |
| Tabela 5.24 - Estimativas de profundidade da fenda mais próxima da extremidade do provete V4, simuladas com diferentes profundidades no SimSonic | 95 |

ÍNDICE DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

| | |
|--------------------|--|
| b | ordenada na origem de reta |
| $b_{\text{médio}}$ | valor médio das ordenadas na origem |
| c | velocidade de fase ou de propagação da frente de onda [m/s] |
| c_a | velocidade de fase de onda longitudinal no meio a [m/s] |
| c_b | velocidade de fase de onda longitudinal no meio b [m/s] |
| c_L | velocidade de fase de uma onda longitudinal [m/s] |
| c_T | velocidade de fase de uma onda transversal [m/s] |
| c_{Sa} | velocidade de fase da onda S_a [m/s] |
| c_{Sb} | velocidade de fase da onda S_b [m/s] |
| $C_{ij}(x)$ | tensor de rigidez elástica de quarta ordem de um material [Pa], [GPa] |
| d | versor de polarização de uma onda plana |
| d_e | espaço dimensional do problema [.] |
| D_0 | diâmetro de referência do provete [m], [mm] |
| E | módulo de elasticidade [Pa], [GPa] |
| E_d | módulo de elasticidade dinâmico [Pa], [GPa] |
| E_p | módulo de elasticidade do provete [Pa], [GPa] |
| f_c | frequência central [Hz], [kHz] |
| f_o | frequência de emissão de onda [Hz], [kHz] |
| f_{pi} | componente i do vetor das forças [N] |
| G | módulo de distorção [Pa], [GPa] |
| h | profundidade de fenda [m], [cm] |
| k | constante de onda designada por número de onda |
| k_i | fator de correção da velocidade de propagação tendo em conta a presença de armaduras |
| L | distância do transdutor-emissor à fenda [m] |
| L_0 | distância de referência do alongâmetro [m], [mm] |

| | |
|------------------|---|
| L_i | percurso de onda para a medição i [m] |
| L_{total} | distância entre os centros do transdutor-emissor e transdutor-recetor [m] |
| L_C | percurso de propagação de onda com a presença de uma fenda [m] |
| L_S | distância entre extremidades de armaduras [m] |
| L_{SF} | percurso de propagação de onda sem a presença de uma fenda [m] |
| M | módulo de compressibilidade confinado [Pa], [GPa] |
| n | declive da reta |
| p | versor da direção de propagação [.] |
| P_i | onda longitudinal incidente |
| P_a | onda longitudinal propagada no meio a |
| P_b | onda longitudinal propagada no meio b |
| P_{2a} | onda longitudinal propagada para a barra de Hopkinson transmitida |
| P_{2b} | onda longitudinal refletida para o provete |
| r | vetor de posição da frente de onda no espaço [m] |
| S_a | onda transversal propagada no meio a |
| S_b | onda transversal propagada no meio b |
| S_v | desvio padrão |
| t | tempo de propagação de onda sonora [s], [ms] |
| t_1 | tempo de propagação para a distância X [s], [ms] |
| t_2 | tempo de propagação para a distância $2X$ [s], [ms] |
| T | diferença entre os tempos de propagação calculados imediatamente antes da fenda e imediatamente depois da fenda [s], [ms] |
| T_1 | tempo de propagação calculado imediatamente antes da fenda [s], [ms] |
| T_2 | tempo de propagação calculado imediatamente depois da fenda [s], [ms] |
| $T_a(x)$ | equação da reta que aproxima as leituras de tempo de propagação antes da fenda |
| $T_d(x)$ | equação da reta que aproxima as leituras de tempo de propagação depois da fenda |
| $\overline{T_d}$ | valor médio das leituras do tempo de propagação depois da fenda |

| | |
|----------------|---|
| T_i | tempo de propagação medido no transdutor i [s], [ms] |
| T_{Pij} | componentes do Tensor de tensão |
| T_C | tempo de propagação de onda com a presença de uma fenda [s], [ms] |
| T_{SF} | tempo de propagação de onda sem a presença de uma fenda [s], [ms] |
| u | deslocamento [m] |
| U_+ | amplitude de onda no sentido da primeira propagação |
| U_- | amplitude de onda no sentido da parcela refletida |
| U_i | amplitude da onda longitudinal incidente |
| U_{Pa+} | amplitude da onda longitudinal transmitida do provete para a barra de Hopkinson |
| U_{Pb+} | amplitude da onda longitudinal transmitida da barra de Hopkinson para o provete |
| U_{Pb-} | amplitude da onda longitudinal refletida para o provete |
| U_{P+} | amplitude de uma onda longitudinal transmitida |
| U_{P-} | amplitude de uma onda longitudinal refletida |
| U_{S+} | amplitude de uma onda transversal transmitida |
| U_{S-} | amplitude de uma onda transversal refletida |
| V | velocidade de propagação [m/s] |
| \bar{V} | velocidade média de propagação [m/s] |
| $V_{pi}(x, t)$ | componentes vetoriais do campo da velocidade das partículas |
| V_C | velocidade de propagação de onda no betão [m/s] |
| V_S | velocidade de propagação de onda no aço [m/s] |
| \bar{x} | valor médio da distância entre transdutores [m] |
| X | distância do transdutor-emissor e transdutor-recetor ao centro da fenda [m], [cm] |
| X_i | distância do transdutor i ao centro da fenda [m], [cm] |
| α | ângulo entre a reta que aproxima os tempos de propagação antes da fenda e a horizontal [°C] |
| α_i | relação entre impedâncias da propagação de uma onda do meio a para o meio b |
| α_{Sa} | ângulo de reflexão da onda transversal [°C] |
| α_{Sb} | ângulo de refração da onda transversal [°C] |

| | |
|-----------------|---|
| β | relação entre impedâncias da propagação de uma onda do meio b para o meio p |
| β_i | relação entre impedâncias da propagação de uma onda do meio p para o meio b |
| γ | quociente entre a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas no betão e velocidade de propagação das ondas no aço |
| δ | ângulo entre a trajetória aparente da onda ultrassónica e a normal dos transdutores [°C] |
| Δ_a | variação do comprimento longitudinal provocada pela aplicação da tensão máxima ao provete no ensaio de compressão [m], [mm] |
| Δ_b | variação do comprimento longitudinal provocada pela aplicação da tensão mínima ao provete no ensaio de compressão [m], [mm] |
| Δ_{r1} | variação de comprimento radial registada no defletómetro 1 num ensaio de compressão [m], [mm] |
| Δ_{r2} | variação de comprimento radial registada no defletómetro 2 num ensaio de compressão [m], [mm] |
| ε_a | extensão longitudinal provocada pela tensão máxima aplicada ao provete no ensaio de compressão |
| ε_b | extensão longitudinal provocada pela tensão mínima aplicada ao provete no ensaio de compressão |
| ε_f | extensão provocada por uma onda longitudinal transmitida na barra de Hopkinson |
| ε_i | extensão provocada por uma onda longitudinal incidente na barra de Hopkinson |
| ε_r | extensão radial |
| ε_g | extensão |
| θ_{ij} | componentes do tensor das extensões |
| λ | primeira constante de Lamé (módulo volumétrico de um material elástico) [Pa] |
| λ_o | comprimento de onda [m], [mm] |
| μ | segunda constante de Lamé (módulo de corte de um material) [Pa] |
| ν | coeficiente de Poisson [.] |
| ρ | massa volúmica [kg/m ³] |
| ρ_a | massa volúmica do meio a [kg/m ³] |

| | |
|---------------------|---|
| ρ_b | massa volúmica do meio b [kg/m ³] |
| $\rho_a \times c_a$ | impedância do meio a |
| $\rho_b \times c_b$ | impedância do meio b |
| $\rho_p \times c_p$ | impedância do meio p |
| $\sigma(r, t)$ | tensão provocada por uma onda longitudinal na posição r e no instante t |
| σ_a | tensão máxima aplicada ao provete no ensaio de compressão [Pa], [GPa] |
| σ_b | tensão mínima aplicada ao provete no ensaio de compressão [Pa], [GPa] |
| σ_g | tensão genérica [Pa] |
| σ_i | tensão provocada pela primeira propagação de uma onda longitudinal [Pa] |
| σ_p | tensão provocada por uma onda longitudinal [Pa] |
| σ_r | tensão provocada pela reflexão de uma onda longitudinal [Pa] |
| σ_{Hi} | tensão provocada na barra de Hopkinson pela onda incidente [Pa] |
| σ_{HT} | tensão provocada na barra de Hopkinson pela onda transmitida [Pa] |
| ω | frequência circular de onda [rads/s] |

| | |
|----------|---|
| BS | British Standard |
| CDPAI | Critério de deteção visual do primeiro pico de amplitude |
| CDPAII | Critério de deteção visual do segundo pico de amplitude |
| CDVPP | Critério de deteção visual da primeira perturbação da onda |
| DBB | Departamento de Barragens de Betão |
| DG | Departamento de Geotecnia |
| DM | Departamento de Materiais |
| FDTD | Finite Difference Time Domain |
| LNEC | Laboratório Nacional de Engenharia Civil |
| MPMP | Método de Pinto Medeiros e Padaratz |
| NDT | Non-Destructive Techniques |
| PUNDIT | Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester |
| Tpontual | Transdutor com modelação numérica pontual |
| T5cm | Transdutor com modelação numérica de 5 cm de diâmetro |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

Atualmente, o aumento do número de construções existentes e o desenvolvimento das grandes áreas urbanas promoveram a reabilitação de estruturas a ramo de elevada importância na Engenharia Civil. A necessidade de reabilitar uma estrutura de betão (por exemplo, um edifício ou um viaduto, no caso de uma área urbana, uma ponte ou uma barragem) pode surgir de causas diversas, nomeadamente erros de projeto onde não são quantificadas as ações adequadas à estrutura dimensionada, erros de construção, degradação dos materiais e consequente redução da resistência da estrutura, e/ou alteração do tipo de uso da estrutura, que conduzindo ao agravamento das ações para que foi dimensionada.

Para a reabilitação de uma estrutura é necessário proceder à sua caracterização, começando pelas suas características geométricas, depois os materiais e o seu estado de conservação e fazendo um levantamento dos defeitos estruturais. No âmbito da caracterização de estruturas são frequentemente utilizados diversos métodos: uns, considerados destrutivos, que envolvem em muitos casos a recolha de provetes da estrutura e o seu ensaio; outros, designados por métodos não destrutivos, permitem que se efetue uma análise sem danificar a estrutura. Estes métodos, destrutivos e não destrutivos, podem ser combinados entre si de modo a melhorar a informação sobre o material ou a estrutura a caracterizar.

Os métodos destrutivos apresentam algumas desvantagens, salientando-se o seu elevado custo e o facto de, em muitos casos, ser necessário recolher um elevado número de provetes de modo a ter uma amostra representativa do estado da estrutura. A extração de provetes para ensaio não pode comprometer a estabilidade, limitando desta maneira não só a zona mas também o número de provetes a extrair e, consequentemente, a representatividade da análise da estrutura. No caso da aplicação em edifícios e pontes estes métodos poderão ter implicações a nível estético. Existem ensaios destrutivos que não implicam a recolha de provetes da estrutura, mas que exigem que sejam feitas perfurações de modo a inspecionar o interior da estrutura recorrendo a tubos endoscópios. Para aplicação dos métodos destrutivos é, em muitos casos, necessária autorização especial, e um controlo rigoroso nos locais de extração dos provetes [1]. O custo associado, já referido, é frequentemente um obstáculo à realização deste tipo de ensaios.

As técnicas não destrutivas, designadas por “Non-Destructive Techniques” (NDT), podem também ser usadas para a caracterização de estruturas, e têm a grande vantagem de não

comprometer a sua utilização. As NDT são todas as técnicas que de uma maneira não destrutiva permitem a obtenção de informações sobre a estrutura em análise. Algumas destas técnicas estão em desenvolvimento contínuo, não havendo ainda, em alguns casos, precisão suficiente nos resultados obtidos. De referir que algumas técnicas consideradas não destrutivas podem danificar superficialmente a superfície de ensaio, não tendo, no entanto, implicações a nível estrutural.

A Tabela 1.1 apresenta as principais técnicas não destrutivas utilizadas no estudo de estruturas de betão e as suas aplicações [2]. A análise da tabela permite verificar que os ultrassons são a técnica não destrutiva com maior número de aplicações, e que é a única técnica não destrutiva que permite obter uma estimativa do módulo de elasticidade do betão e da profundidade de fendas. Os ensaios de ultrassons têm diversas aplicações em Engenharia Civil: i) na determinação do módulo de elasticidade dinâmico do material ; ii) na monitorização do processo de cura de materiais cimentícios e de outro tipo; iii) na deteção de descontinuidades e heterogeneidades numa estrutura; iv) na caracterização de defeitos e caracterização do estado de conservação dos materiais.

Apesar de os ultrassons serem utilizados muito frequentemente, trata-se de uma técnica ainda em desenvolvimento, pois apresenta algumas limitações. Os trabalhos que têm sido desenvolvidos revelam que é uma técnica mais adequada para caracterizar materiais homogêneos, não tendo um resultado tão satisfatório com materiais heterogêneos. O sucesso da sua aplicação na caracterização de estruturas em betão deve-se ao facto de se verificar que, apesar de ser considerado um material heterogêneo, em termos globais o betão pode ser considerado um material aparentemente homogêneo. A modelação numérica de ensaios de ultrassons em materiais heterogêneos poderá ser uma valiosa ferramenta para a validação das técnicas usualmente utilizadas, também na presença de heterogeneidade.

Para além da vantagem da propagação de ondas ultrassónicas ser uma técnica não intrusiva, a sua aplicação prática é simples, fácil de executar em obra e o transporte dos equipamentos utilizados é fácil.

As ondas ultrassónicas têm uma frequência de propagação muito alta (superior a 20 kHz), inaudível para o ser humano, e as características da sua propagação estão direta ou indiretamente ligadas às propriedades mecânicas dos materiais.

Tabela 1.1 - Técnicas não destrutivas utilizadas na caracterização de estruturas de betão (adaptado de IAEA 2005 [2])

| | | Aplicações | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---|-------------|------------------------|----------------------|------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------|--------|-------------|--------------------------|------------------------|---------------------------|
| | | Resistência | Módulo de Elasticidade | Espessura de camadas | Profundidade de fendas | Abertura de fendas | Distribuição de fendas | Desenvolvimento de fendas | Vazios | Delaminação | Localização de armaduras | Dimensão das armaduras | Deterioração de armaduras |
| Métodos não destrutivos | Rebound Hammer | ● | | | | | | | | | | | |
| | Esclerómetro de reflexão | ● | | | | | | | | | | | |
| | <i>Pull-out test</i> | ● | | | | | | | | | | | |
| | Ultrassons | ● | ● | ● | ● | | | | ● | ● | ● | | |
| | Radar | | | | | | | | ● | ● | ● | | |
| | Termografia | | | | | | ● | | ● | ● | | | |
| | Radiografia | | | ● | | | | | ● | | ● | ● | ● |
| | Emissão acústica | | | | | | | ● | | | | | |
| | Corrente magnética | | | | | | | | | | ● | ● | ● |
| | <i>Half-cell Potential</i> (corrente elétrica) | | | | | | | | | | | | ● |
| | Fotografia | | | | | ● | ● | | | | | | |

1.2 Motivação

No âmbito do acompanhamento da construção ou do comportamento ao longo do tempo de grandes barragens de betão, tem sido por diversas vezes solicitada ao LNEC a elaboração de ensaios “in situ” de propagação de ondas ultrassónicas. Os ensaios são efetuados para obter informações sobre a homogeneidade do betão e para determinar a profundidade de fendas. Embora estes ensaios sejam relativamente fáceis de realizar, a análise dos resultados é complexa. Em particular, no caso da determinação da profundidade de fendas, surgem por vezes dúvidas em relação à precisão dos resultados obtidos.

1.3 Objetivos

Neste trabalho pretende-se verificar a fiabilidade e a precisão dos ensaios de ultrassons para analisar a homogeneidade de estruturas em betão, determinar o módulo de elasticidade do betão e a profundidade de fendas existentes em estruturas.

1.4 Organização da tese

A tese está organizada em 6 capítulos. Após este capítulo 1, em que se apresenta o tema da dissertação e se definem os seus objetivos, é feita, no capítulo 2, uma breve referência ao modo de propagação de ondas sonoras e ultrassonoras. No capítulo 3 apresentam-se as principais aplicações dos ultrassons na caracterização de estruturas de betão bem como as principais dificuldades na aplicação dos ultrassons e na interpretação de resultados. No capítulo 4 descreve-se a atividade experimental desenvolvida, e apresenta-se uma análise crítica dos resultados obtidos. No capítulo 5 apresenta-se a modelação numérica dos ensaios efetuados. Por fim, no capítulo 6, apresentam-se as principais conclusões do trabalho e perspetivas de desenvolvimentos futuros.

2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS SONORAS

2.1 Ondas sonoras

O som resulta da propagação de ondas de pressão (rarefação e adensamento alternados) através de meios compressíveis, como o ar ou a água. O som também se propaga em sólidos, mas fazendo-se acompanhar de outros modos de propagação, como seja o associado a ondas transversais [3]. As ondas sonoras são perturbações mecânicas, puramente dilatacionais, introduzidas num material, que se propagam de um ponto para o outro transmitindo energia sem transporte de matéria [4]. Quando a perturbação é introduzida num meio em equilíbrio, por exemplo por impacto, as partículas iniciam um movimento vibratório que se vai propagando às partículas vizinhas, e, progressivamente, a todo o meio. Este movimento de oscilação, num meio elástico, pode ser descrito pelo movimento da partícula material, associado a uma rigidez entre partículas. Esta pode ser ilustrada de forma simplificada pela analogia de uma mola, responsável pela restituição elástica, e assim co-responsável pela oscilação em conjunto com a massa volúmica e a polarização. A caracterização deste movimento periódico através da amplitude, frequência e velocidade de fase permite a descrição das ondas sonoras.

Generalizando este conceito para todas as partículas de um material, é possível idealizar um modelo da dinâmica de interação de partículas excitadas (Figura 2.1). Quando é introduzida uma perturbação numa qualquer partícula do meio, esta transmite a energia recebida às partículas vizinhas através das “molas” que as ligam mutuamente, propagando-se num movimento global do sistema com oscilações das partículas. Quanto maior a rigidez das molas e maior a densidade do meio, mais facilitada é a propagação desta energia. No limite, considerando-se estas molas com rigidez infinita ter-se-ia uma propagação instantânea, isto é, uma velocidade de fase infinita [5].

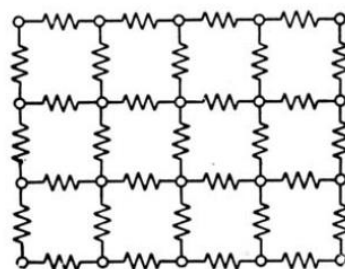


Figura 2.1 - Esquema de relação entre partículas de um material elástico [6]

A frequência das ondas sonoras distingue a sua classificação em: subsônicas - até 16 Hz; sônicas - entre os 16 Hz e os 20 kHz que corresponde à gama de frequência audível pelos seres humanos; e ultrassônicas – com frequências superiores a 20 kHz.

2.2 Propagação de ondas mecânicas

Quando é aplicada uma perturbação mecânica num material sólido espacialmente limitado são gerados dois tipos de ondas [7]: as ondas volúmicas e as ondas superficiais. As primeiras podem ser de dois tipos: ondas longitudinais (ou dilatacionais) e ondas transversais (ou de corte).

As ondas longitudinais ou de compressão (P), (Figura 2.2 a), com polarização na direção da propagação, são ondas irrotacionais, isto é, que preservam a forma do corpo. São as mais importantes no estudo da caracterização de estruturas, pois são as ondas com a velocidade mais elevada e que fornecem informação mais rica sobre o meio de propagação. As ondas ultrassônicas incluem ondas deste tipo, por isso a propagação das ondas longitudinais é de maior relevância no assunto desta tese.

Por sua vez, as ondas transversais (Figura 2.2 b), induzem movimento perpendicular à direção de propagação de onda, sendo isovolúmicas.

Por último, as ondas superficiais, (Figura 2.2 c) e d)), têm esta designação pois a sua propagação dá-se próximo da superfície do meio de propagação. Estas ondas têm uma velocidade inferior aos restantes tipos de onda.

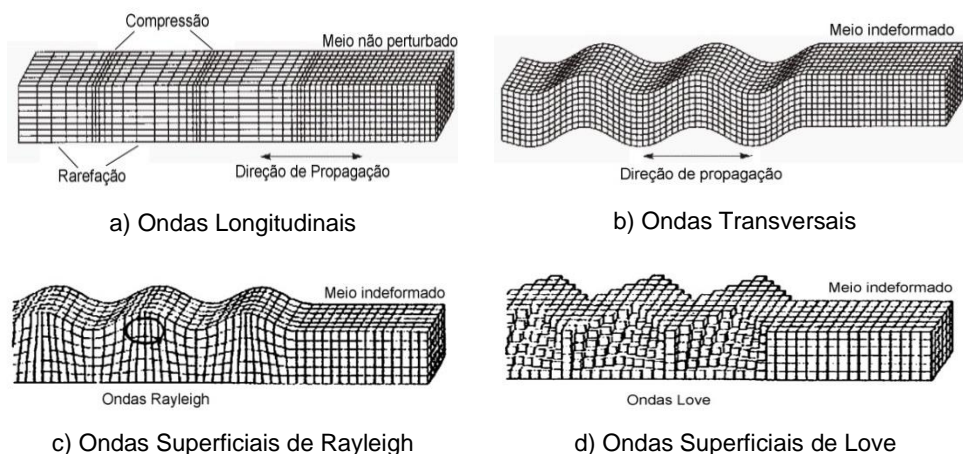


Figura 2.2 - Tipos de ondas sonoras [8]

A equação geral da propagação de ondas monocromáticas, harmônicas puras, pode ser expressa em termos do campo de deslocamentos u associado à frente de onda, dado por:

$$\mathbf{u}(r, t) = \mathbf{U}_+ e^{i\omega(t - \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{c})} + \mathbf{U}_- e^{i\omega(t + \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{c})} \quad 2.1$$

em que r representa o vector posição da frente de onda num espaço tridimensional, t o tempo de propagação, ω a frequência angular da onda, p o versor da direção de propagação da onda com velocidade de fase c (velocidade da frente de onda ao longo da direção p), U_+ o vetor de deslocamento (ou de polarização) associado à onda no sentido da primeira propagação, e U_- o vetor de deslocamento (ou de polarização) associado à onda na sua parcela refletida [9]. Considerando apenas a primeira parcela da equação 2.1 (associada à perturbação causadora da propagação) o campo de deslocamentos pode ser reescrito na seguinte forma:

$$\mathbf{u}(r, t) = \mathbf{U}_+ e^{i\omega(t - \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{c})} = \|\mathbf{U}_+\| e^{i\omega(t - \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{c})} \mathbf{d} \quad 2.2$$

sendo d o versor de U_+ , que representa o vetor de deslocamento induzido pela propagação da onda plana com amplitude $\|\mathbf{U}_+\|$. Existem duas soluções possíveis para esta equação [9], pois o campo $u(r, t)$ é solução da equação fundamental da Elastodinâmica, a qual admite dois tipos de solução, ambos associados a ondas volúmicas. Na primeira solução tem-se:

$$d = p \wedge c = c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad 2.3$$

em que λ é a primeira constante de Lamé, relativa ao módulo volumétrico do material, μ é a segunda constante de Lamé, que corresponde ao módulo de distorção do material, ρ é a massa volúmica do meio de propagação e c_L é a velocidade de fase. A equação 2.3 representa a equação de uma onda longitudinal ou onda P, em que a direção do versor de polarização coincide com a direção da propagação.

Na segunda solução são válidas as seguintes igualdades:

$$p \cdot d = 0 \wedge c = c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad 2.4$$

Esta solução corresponde a uma onda transversal, em que a direção do versor de polarização é perpendicular à direção de propagação da onda e a velocidade de fase é c_T [9].

No caso das ondas longitudinais (equação 2.3) a sua velocidade de propagação depende do valor das constantes de Lamé λ e μ relativas ao material do meio de propagação, dadas por:

$$\lambda = \frac{\nu_d E_d}{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)} \quad 2.5$$

$$\mu = \frac{E_d}{2(1 + \nu_d)} \quad 2.6$$

em que E_d representa o módulo de elasticidade dinâmico, e ν_d o coeficiente de Poisson do material em condições dinâmicas.

Substituindo as equações 2.5 e 2.6 na equação 2.3 obtém-se a expressão:

$$c_L = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \sqrt{\frac{(1 - \nu_d)}{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}} \quad 2.7$$

A Figura 2.3 representa a sensibilidade de c_L ao coeficiente de Poisson, entre 0,11 e 0,25, gama de valores correspondente aos registados no betão [10].

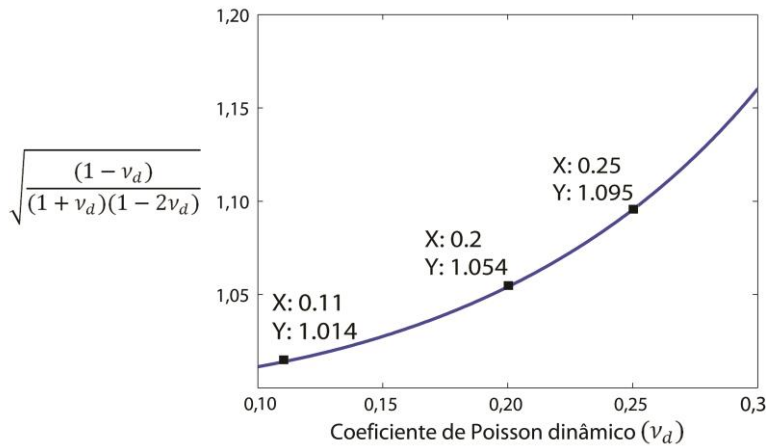


Figura 2.3 - Sensibilidade da velocidade de propagação c_L ao coeficiente de Poisson

2.3 Propagação das ondas através de uma interface entre dois meios diferentes

Quando uma onda plana longitudinal propagada num meio a , que se designa por onda incidente (P_i), encontra uma interface com um meio diferente b , divide-se em quatro componentes (Figura 2.4): uma onda longitudinal refletida para o meio a , (P_a), uma onda transversal refletida para o meio a , (S_a), uma onda longitudinal transmitida para o meio b , (P_b), e uma onda transversal transmitida para o meio b , (S_b).

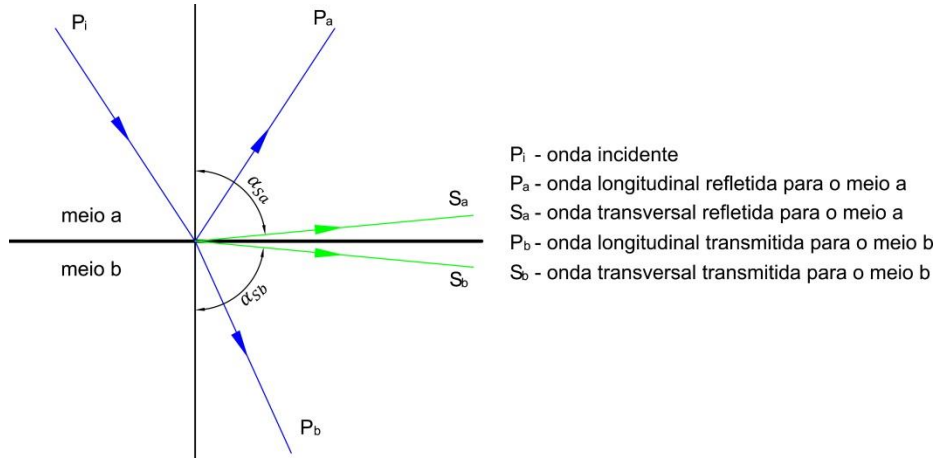


Figura 2.4 - Decomposição de uma onda longitudinal numa interface entre dois meios elásticos [11]

Com base na lei de Snell que rege a reflexão e refração, Zoeppritz [11] expressou a distribuição de energia de uma onda longitudinal incidente relacionando-a com as amplitudes das ondas incidente, refletidas e refratadas. De acordo com este autor, a energia transmitida do meio a para o meio b é dada pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned}
 & -(U_i - U_{P-}) \cos 2\alpha_{Sa} + U_{S-} \frac{c_{Sa}}{c_a} \sin 2\alpha_{Sa} + U_{P+} \frac{\rho_b c_b}{\rho_a c_a} \cos 2\alpha_{Sb} + \\
 & + U_{S+} \frac{\rho_b c_{Sb}}{\rho_a c_a} \cos 2\alpha_{Sb} = 0
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

sendo ρ_a e ρ_b a massa volúmica dos meios a e b, respetivamente; c_a a velocidade de fase das ondas P_i e P_a ; c_b a velocidade de fase da onda P_b ; c_{Sa} a velocidade de fase da onda S_a ; c_{Sb} a velocidade de fase da onda S_b ; U_i a amplitude da onda P_i ; U_{P-} a amplitude da onda P_a ; U_{S-} a amplitude da onda S_a ; U_{P+} a amplitude da onda P_b ; U_{S+} a amplitude da onda S_b ; α_{Sa} o ângulo de reflexão da onda S_a e α_{Sb} o ângulo de refração da onda S_b . Considerando apenas a propagação de ondas longitudinais a equação 2.8 toma a forma simplificada:

$$-(U_i - U_{P-}) \cos 2\alpha_{Sa} + U_{P+} \cos 2\alpha_{Sb} = 0 \tag{2.9}$$

As amplitudes de U_i e U_{P-} podem ser deduzidos a partir da equação 2.2 compatibilizando os deslocamentos e impondo o equilíbrio na fronteira entre o meio a e o meio b, induzidos pelas ondas incidente, transmitida e refletida. Desta forma, consegue-se relacionar a amplitude da onda P_i com a amplitude da onda P_a e, também, relacionar a amplitude da onda P_i com a amplitude da onda P_b . Designando por β a razão entre a impedância do meio de refração (transmissão) $\rho_b c_b$ e a impedância do meio de incidência $\rho_a c_a$, obtêm-se as razões de transmissão e de reflexão das amplitudes das ondas.

$$\alpha_i = \frac{\rho_b c_b}{\rho_a c_a} \quad 2.10$$

$$\frac{U_{P-}}{U_i} = \frac{1 - \alpha_i}{1 + \alpha_i} \quad 2.11$$

$$\frac{U_{P+}}{U_i} = \frac{2}{1 + \alpha_i} \quad 2.12$$

Quando $\rho_a c_a \gg \rho_b c_b$, o valor de α_i tenderá para um valor nulo. Nesse limite, da equação 2.11, obtém-se a igualdade, $U_{P-} = U_i$, o que significa que a totalidade da amplitude da onda incidente P_i é refletida. Substituindo as duas igualdades anteriores na equação 2.9 verifica-se que esta toma um valor nulo, ou seja que a transmissão de energia entre dois meios é quase nula. Um caso particular de em que se verifica esta situação é o da interface entre um meio sólido e o ar, em que o meio sólido tem uma impedância muito superior à impedância do ar. Esta conclusão tem importância para os métodos de propagação das ondas ultrassónicas que irão ser abordados neste trabalho.

A importância do estudo da propagação de ondas através de uma interface entre dois meios diferentes é bem evidente no desenvolvimento da barra de Hopkinson, inventada em 1914 por Bertram Hopkinson, para quantificar os esforços induzidos pela propagação de ondas num provete do material a ensaiar. Mais tarde, em 1949, H.Kolsky aperfeiçoou a técnica de Hopkinson, usando duas barras metálicas colocadas em série com o provete, designadas por *split-Hopkinson bars*, para a medição de extensões, e, a partir destas, determinar a impedância do provete.

Este tipo de ensaio consiste em colocar um provete entre dois batentes metálicos, o primeiro designado por batente de incidência e o segundo por batente de transmissão (Figura 2.5). É gerada uma onda de compressão no batente de incidência a qual atravessa sucessivamente o provete e o batente de transmissão. Esta onda designada por onda incidente, P_i , ao chegar à interface entre o batente e o provete, decompõe-se numa onda longitudinal refletida para a barra incidente, P_a , e numa onda refratada para o provete, P_b . Depois de atravessar o provete, a onda longitudinal, P_b , encontra uma nova interface, entre o provete e o batente de transmissão, decompondo-se de novo em duas ondas longitudinais: uma onda refletida para o provete, P_{2b} , e uma onda refratada para a barra transmitida, P_{2a} . São medidas as extensões provocadas nos batentes pelas ondas incidente, P_i , e transmitida, P_{2a} . A medição dessas extensões permite estabelecer uma relação entre as características dos batentes e do provete a qual permite determinar experimentalmente a impedância do provete e, se conhecida a sua massa volúmica, o módulo de elasticidade (E_p) do material do provete.



Figura 2.5 - Esquema da barra de Hopkinson

Como referido anteriormente, quando a onda encontra uma heterogeneidade no meio de propagação é possível relacionar a amplitude das ondas incidente e transmitida através da compatibilização de deslocamentos e do equilíbrio de tensões nessa fronteira.

A equação 2.12 permite relacionar a amplitude da onda incidente com a amplitude da onda transmitida para uma dada razão α_i . Assume-se que as barras de Hopkinson apresentam uma impedância de $\rho_b c_b$ conhecida e o provete tem uma impedância de $\rho_p c_p$ com massa volúmica do provete, ρ_p , conhecida. No caso desta experiência existem duas fronteiras diferentes: a primeira em que a razão de impedâncias é β , razão entre as impedâncias do meio b (o primeiro batente) para o meio p (o provete), definida na equação 2.13, e β^{-1} , a relação (inversa) entre as impedâncias da propagação do meio p para o meio b (o segundo batente). Admite-se que a secção transversal do meio b é igual à secção transversal do meio p.

$$\beta = \frac{\rho_b c_b}{\rho_p c_p} \quad 2.13$$

Designando por U_{Pa+} , a amplitude da onda transmitida do batente de incidência para o provete (onda P_b), e por U_{Pb+} a amplitude da onda transmitida do provete para o batente de transmissão (onda P_{2a}), e usando a expressão 2.12 substituindo pelas amplitudes referidas obtém-se:

$$\frac{U_{Pa+}}{U_i} = \frac{2}{1 + \beta} \quad 2.14$$

$$\frac{U_{Pb+}}{U_{Pa+}} = \frac{2}{1 + \beta^{-1}} \quad 2.15$$

$$\frac{U_{Pb+}}{U_i} = \frac{4}{(1 + \beta)(1 + \beta^{-1})} \Leftrightarrow \frac{U_{Pb+}}{U_i} = \frac{4}{(1 + \beta)(1 + \beta^{-1})} \quad 2.16$$

A determinação experimental da razão entre estas amplitudes permite estimar o valor do módulo de elasticidade do provete. De facto, a propagação de uma onda unidimensional provoca tensões

no meio de propagação, sendo estas tensões dadas, em função do tempo de propagação, t , e em função da sua posição no espaço, r , por:

$$\sigma(r, t) = \rho c_L \dot{u}(r, t) \quad 2.17$$

sendo, $\dot{u}(r, t)$ a velocidade instantânea. Decompondo a função $\dot{u}(r, t)$ nas suas duas componentes de sentido de propagação, obtêm-se as seguintes tensões: $\sigma_i(r, t)$, a tensão provocada pela propagação da onda incidente, e $\sigma_r(r, t)$, a tensão provocada pela propagação da onda refletida quando encontra a heterogeneidade. Sendo k o número de onda, tem-se:

$$\sigma_i(r, t) = -\rho c_L U_i \omega i e^{i(\omega t - kr)} \quad 2.18$$

$$\sigma_r(r, t) = \rho c_L U_r \omega i e^{i(\omega t + kr)} \quad 2.19$$

Admitindo o comportamento elástico do material têm-se pela lei de Hooke:

$$\sigma_g = \varepsilon_g E \quad 2.20$$

e pelas equações 2.18 e 2.20, a tensão barra de Hopkinson transmitida, σ_{HT} , é dada por:

$$\sigma_{HT} = \rho_p c_p U_{T_2} \omega i e^{i(\omega t - kx)} \quad 2.21$$

$$\sigma_{HT} = \varepsilon_f E_b \quad 2.22$$

com ε_f a extensão medida na barra de Hopkinson transmitida, e E_b o módulo de elasticidade da Barra de Hopkinson. Igualando as expressões 2.21 e 2.22 temos:

$$U_{pb+} = \frac{\varepsilon_f E_a}{\rho_b c_b \omega i e^{i(\omega t - kx)}} \quad 2.23$$

Fazendo uma análise semelhante para a tensão na barra de Hopkinson incidente, σ_{Hi} ,

$$\sigma_{Hi} = \rho_b c_b U_i \omega i e^{i(\omega t - kx)} \quad 2.24$$

$$\sigma_{Hi} = \varepsilon_i E_b \quad 2.25$$

com ε_i a extensão medida na barra de Hopkinson incidente. Igualando as expressões 2.24 e 2.25 obtém-se:

$$U_i = \frac{\varepsilon_i E_b}{\rho_b c_b \omega i e^{i(\omega t - kx)}} \quad 2.26$$

substituindo as Equações 2.23 e 2.26 na equação 2.16 obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{\frac{\varepsilon_f E_b}{\rho_b c_b \omega i e^{i(\omega t - kx)}}}{\frac{\varepsilon_i E_b}{\rho_b c_b \omega i e^{i(\omega t - kx)}}} = \frac{4}{(1 + \beta)(1 + \beta^{-1})} \Leftrightarrow \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_i} = \frac{4}{(1 + \beta)(1 + \beta^{-1})} \quad 2.27$$

Desta equação é possível obter o valor de β a partir do qual, sabendo a impedância dos batentes e a massa volúmica do provete, é possível estimar o módulo de elasticidade do provete.

3 UTILIZAÇÃO DE ULTRASSONS NA CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS

Os ensaios de ultrassons são ensaios sónicos caracterizados pela particularidade da frequência da onda ser superior a 20 kHz, inaudível pelos seres humanos. O uso desta gama de frequências confere características particulares à onda sonora permitindo recolher informações específicas do material por ela atravessado. Em Portugal, a determinação da velocidade de propagação de ondas longitudinais ultrassónicas no betão de estruturas encontra-se especificada na Norma NP EN 12504-4, na qual é referido que se reconhece que a velocidade dos ultrassons determinada de acordo com essa norma é uma convenção, pois o percurso em que o som se desloca não é bem conhecido [12].

3.1 Ensaios de ultrassons

O uso das ondas ultrassónicas como técnica não destrutiva para caracterização de materiais constituintes de estruturas tem, como fundamento principal, a relação teórica entre os parâmetros e grandezas da propagação de ondas ultrassónicas e as propriedades elásticas daqueles materiais.

A velocidade de propagação de ondas ultrassónicas é um dos parâmetros que está diretamente relacionado com o módulo de elasticidade dinâmico do material, e indiretamente com a sua resistência à compressão, sendo esta última relação reconhecidamente mais difícil de sustentar [13]. Uma análise qualitativa da velocidade das ondas sónicas pode indicar zonas do material com deterioração, heterogeneidade, ou a presença de defeitos ou fendas.

Outra grandeza de interesse é a amplitude da onda ultrassónica, pois a variação desta grandeza pode fornecer informações sobre o estado do material e até mesmo sobre zonas com defeitos estruturais importantes.

A combinação dos métodos de análise da velocidade das ondas ultrassónicas e da sua amplitude pode levar a uma melhor quantificação das propriedades mecânicas nomeadamente a resistência à compressão, como ilustrado por Liang [14].

3.2 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

A velocidade de propagação das ondas ultrassônicas em materiais estruturais tem sido objeto de diversos estudos devido ao facto de ser uma grandeza diretamente relacionável com o módulo de elasticidade dinâmico e com a massa volúmica do meio de propagação (ver equação 2.7). Esta relação foi demonstrada [8] relacionando as características mecânicas do material com as equações de propagação de ondas. Alguns autores [7, 14-16] verificaram experimentalmente esta relação. É também possível relacionar indiretamente a velocidade de propagação das ondas com algumas propriedades mecânicas do material como a resistência à compressão [7, 14, 15] e a resistência à tração [15]. No entanto, a caracterização destas propriedades mecânicas para estruturas de betão, utilizando apenas a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, é bastante complexa. Popovics [13] afirma não ser possível calcular com precisão aceitável a resistência à compressão do betão, utilizando apenas como dado experimental a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Segundo este autor, devem ser usados métodos complementares para melhorar a precisão da determinação dos parâmetros de resistência à compressão do betão, que envolvem o estudo combinado da medição da velocidade de ondas e da medição da sua amplitude.

Do ponto de vista qualitativo é razoável esperar que a observação direta dos valores de velocidade de propagação numa estrutura possa permitir tirar conclusões sobre o estado de conservação da mesma [5] e ajudar na deteção das zonas mais deterioradas [17], por comparação com outras zonas de melhor qualidade da mesma estrutura. Esta análise é importante na deteção de defeitos internos, zonas de heterogeneidade do material, zonas deterioradas e até mesmo fendas internas ou vazios no material da estrutura. As zonas de melhor qualidade apresentarão valores de velocidade de propagação mais elevados do que zonas danificadas ou deterioradas. Na Tabela 3.1 apresenta-se uma classificação que relaciona a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas com a qualidade do betão [18]. De referir que a tabela corresponde a betões com massa volúmica próxima de 2400 kg/m³.

Tabela 3.1 - Correspondência entre a qualidade do betão e a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas [18]

| Velocidade de propagação (m/s) | Qualidade do betão |
|--------------------------------|--------------------|
| > 4570 | Excelente |
| 3660-4570 | Boa |
| 3050-3660 | Duvidosa |
| 2130-3050 | Má |
| < 2130 | Muito má |

A velocidade de propagação de ondas ultrassónicas é utilizada não só na deteção de irregularidades em estruturas mas também na caracterização geométrica destas irregularidades. De facto, com base no tempo de propagação é possível estimar a profundidade de uma camada homogénea num material estratificado [7] ou quantificar a profundidade de fendas [4, 7, 19-23]. Nestes estudos utilizam-se diferentes métodos de cálculo baseados em considerações geométricas, relacionando distâncias e tempos de propagação de ondas ultrassónicas.

3.3 Amplitude de propagação de ondas ultrassónicas

A dissipação de amplitude das ondas ultrassónicas durante a sua propagação está relacionada com a capacidade de absorção de energia elástica no material [24, 25]. A absorção de energia por parte do material deve-se a dois fenómenos: i) a transformação de energia mecânica elástica em calor de forma contínua devido à histerese inerente aos movimentos oscilatórios das partículas; e ii) a perda de energia associada à reflexão/refração em zonas pontuais de heterogeneidade no percurso de onda [24]. A variação da atenuação da amplitude permite identificar as zonas com presença de heterogeneidades, que por sua vez poderão corresponder a zonas de defeitos e/ou irregularidades.

3.4 Fatores que influenciam os resultados dos ensaios de ultrassons em betão

Os ensaios de ultrassons devem ser realizados por técnicos qualificados e experientes. Apesar da sua aplicação ser aparentemente simples existem diversas dificuldades a ter em conta nos procedimentos de ensaio e na interpretação dos resultados. Estas dificuldades podem passar despercebidas a um experimentalista menos experiente na realização e interpretação dos ensaios, mas podem ter influência direta nos resultados e conduzir a conclusões incorretas. Apresentam-se de seguida os fatores causadores das dificuldades referidas que devem ser considerados nos ensaios de ultrassons.

3.4.1 Temperatura

A influência da temperatura na velocidade de propagação das ondas apenas é significativa para temperaturas extremas. Em temperaturas entre os 5°C e os 30°C as variações da velocidade de propagação não são relevantes [26].

As altas temperaturas podem causar microfissuras no betão levando o percurso das ondas sonoras a sofrer alteração. Assim, a velocidade aparente de propagação das ondas torna-se

mais reduzida. Por sua vez, sob baixas temperaturas a água presente nos poros do betão tende a solidificar, ficando estes preenchidos por gelo. Este preenchimento dos poros do betão por gelo provoca ligeiros aumentos na velocidade de propagação. Nos casos de temperaturas extremas a norma RILEM [26] propõe o uso das correções percentuais aditivas que se apresentam na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Fatores de correção da velocidade dos ultrassons no betão em função da temperatura [26]

| Temperatura (°C) | Correção (%) | |
|------------------|--------------|----------------|
| | Betão Seco | Betão Saturado |
| 60 | 5 | 4 |
| 40 | 2 | 1,7 |
| 20 | 0 | 0 |
| 0 | -0,5 | -1 |
| -4 | -1,5 | -7,5 |

3.4.2 Estado de tensão na estrutura

Em ensaios laboratoriais considera-se que a velocidade das ondas ultrassónicas apenas é significativamente afetada quando a tensão aplicada atinge valores acima dos 50% da tensão de rotura do provete. Estes estudos foram posteriormente aplicados a vigas de betão sujeitas a esforços de flexão que mostraram características semelhantes, confirmando que com níveis elevados de esforços podem criar-se fissuras nas estruturas que influenciam a propagação das ondas ultrassónicas. Em estruturas pré-esforçadas, devido ao facto de não existir fendilhação, as ondas não são afetadas, com exceção dos casos em que as cargas aplicadas sejam muito elevadas.

Em resumo, as condições de utilização são importantes quando as tensões aplicadas excedem valores na ordem de um terço das de rotura, podendo nestes casos causar fendilhação relevante para provocar alterações no caminho das ondas ultrassónicas, devido à inexistência de propagação na interface betão/ar [7].

3.4.3 Comprimento do percurso de onda

A influência do comprimento do percurso de onda na velocidade aparente de propagação das ondas sonoras é apenas relevante para distâncias muito pequenas ou, ao invés, muito grandes. Neste último caso, é necessário ter ainda em conta o conteúdo em frequência da onda emitida.

De facto, o alcance de uma onda com frequência f_o propagando-se à velocidade V , depende do comprimento de onda λ_o dado por:

$$\lambda_o = \frac{V}{f_o} \quad 3.1$$

Quanto maior for o comprimento de onda, maior a distância a que se consegue detetar a propagação da onda. Como se pode verificar a partir da equação 3.1, as frequências mais altas correspondem comprimentos de onda menores, aumentando assim o ritmo de perda da sua amplitude, e consequentemente encurtando o seu alcance.

Bungey [7] refere que a curtas distâncias as heterogeneidades do betão tornam-se mais evidentes, influenciando as velocidades de propagação, como se pode observar na Figura 3.1. A Norma Portuguesa NP EN 12504-4 recomenda que o percurso mínimo seja de 100 mm quando a máxima dimensão do agregado do betão for ≤ 20 mm e de 150 mm quando esta dimensão estiver entre 20 mm e 40 mm.

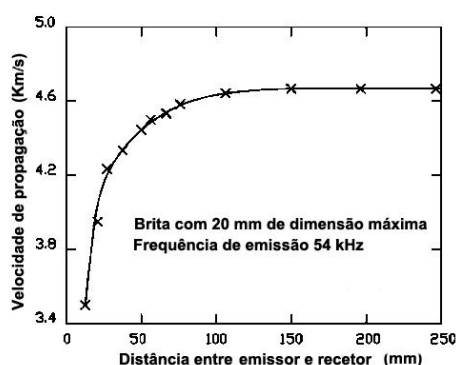


Figura 3.1 - Efeito do percurso de propagação de onda na velocidade de propagação a curta distância entre emissor e recetor de ondas ultrassónicas [7]

3.4.4 Frequência dos emissores de ondas ultrassónicas

De acordo com a NP EN 12504-4 (2007) a frequência dos transdutores deverá estar normalmente dentro da banda de 20 kHz a 150 kHz, podendo algumas vezes utilizar-se frequências tão baixas como 10 kHz ou tão altas como 200 kHz. As altas frequências têm uma frente bem definida, mas, ao atravessar o betão, amortecem mais rapidamente do que as de baixa frequência. É recomendada a utilização de transdutores de alta frequência (60 kHz a 200 kHz) para percursos curtos (abaixo dos 50 mm) e transdutores de baixa frequência (10 kHz a 40 kHz) para percursos longos (até um máximo de 15 m).

3.4.5 Humidade

A humidade do betão, função primordialmente das condições de cura, influencia a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas. Assim, é necessário ter em consideração o estado de hidratação do betão na fase inicial de presa.

A presença de humidade no betão que não derive da sua fase de cura inicial, também deve ser considerada, pois têm influência direta nos resultados dos ensaios com ondas ultrassónicas no betão. A velocidade de propagação de ultrassons no betão em condições saturadas pode atingir valores 5% mais elevados do que no betão em condições secas [7]. No caso dos vazios do betão estarem preenchidos com água a velocidade de propagação aumenta, pois a trajetória das ondas longitudinais sofre menor alteração do que no caso contrário. De facto, se os vazios do betão estiverem secos e preenchidos apenas com ar, o percurso da frente de onda somente se desenrolará na parte sólida, aumentando assim a sua velocidade aparente de propagação.

O efeito da humidade e da presença de água no betão pode, no entanto, induzir resultados enganadores no que diz respeito à deteção de defeitos na estrutura, nomeadamente na quantificação da profundidade de fendas. No caso das fendas se encontrarem total ou parcialmente preenchidas com água, obtêm-se estimativas de profundidade de fendas inferiores à profundidade real ou até mesmo pode não ser possível realizar a sua deteção.

3.4.6 Presença de armaduras

A presença de armaduras numa estrutura pode influenciar significativamente a velocidade de propagação das ondas. A velocidade de propagação das ondas num meio infinito de aço terá valores perto dos 5900 m/s, verificando-se, no entanto, que estes valores são inferiores quando um varão de aço com diâmetro limitado se encontra embebido no betão. Neste caso, a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas depende das condições de aderência entre o betão e o aço e das condições de propagação no betão [7]. Esta influência das armaduras deve-se ao facto da onda ultrassónica mais rápida, a primeiro ser detetada, se propagar através de trajetórias mistas entre betão e aço (Figura 3.2). Para evitar incertezas de medições do tempo de propagação devem ser evitadas, caso seja possível, as zonas de grande concentração de armaduras. No caso contrário deve ter-se em consideração a presença das armaduras, para contabilizar o aumento da velocidade. As correções da velocidade têm em conta a direção das armaduras em relação à direção de propagação das ondas [7].

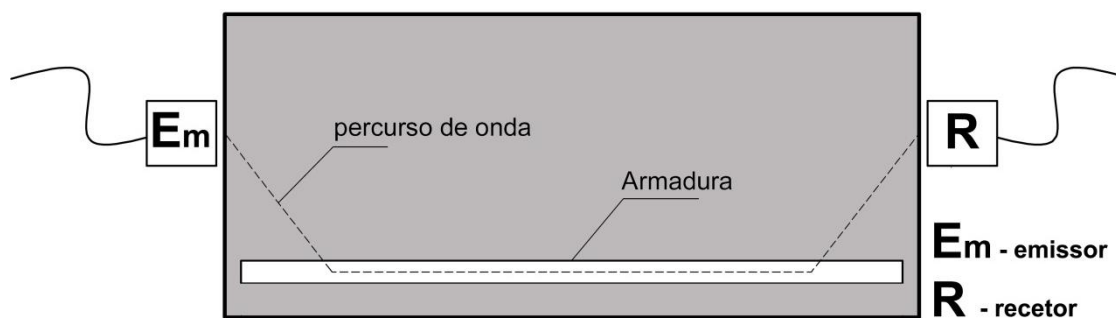


Figura 3.2 - Direção de propagação paralela à direção das armaduras [7]

3.4.7 Composição do betão

O betão é constituído por uma mistura de cimento Portland, agregados e água. Diversos autores consideram que a proporção desta mistura afeta a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas. De facto, vários estudos revelam que quanto maior a razão água/cimento menor a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas no betão [4, 27]. Esta redução de velocidade pode ser explicada com o aumento de vazios na pasta de cimento causada pelo aumento da quantidade de água de mistura.

Os agregados no betão ocupam grande parte do seu volume. É expectável, por isso, que tenham influência na velocidade de propagação das ondas ultrassónicas. Existem diversos tipos de agregados que podem ser utilizados no fabrico de betão, e a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas na rocha mãe destes agregados pode variar entre 2500 e 6000 m/s. Assim, é de esperar que betões em que sejam utilizados agregados com uma densidade mais elevada (logo com velocidade de propagação mais elevada) apresentem velocidades de propagação mais elevadas [28].

Alguns estudos revelam que a dimensão máxima do agregado também tem influência nas velocidades de propagação no betão. No entanto, existem resultados contraditórios. Referem-se, como exemplo, os estudos apresentados por Medeiros [4] e Saad e Abo-Qudais [27]. Medeiros, apoiando a sua investigação noutros autores, conclui que quanto maior for a dimensão máxima do agregado maior a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas nesse betão [4]. No entanto, Saad e Abo-Qudais ensaiaram provetes de betão de diversas composições e concluíram que quanto maior a dimensão do agregado menores são as velocidades de propagação das ondas ultrassónicas no betão [27]. Apesar de contraditórias, ambas as situações admitem explicação plausível e compatíveis entre si. Por um lado, o facto de o agregado ser maior, se este apresentar velocidades de propagação elevadas (normalmente superiores à pasta de cimento) pode implicar um aumento da velocidade de propagação no betão. Por outro, o

aumento da dimensão do agregado pode fornecer a heterogeneidade do betão, influenciando a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas.

3.4.8 Forma e dimensão do elemento estrutural

De uma maneira geral, nem a forma nem as dimensões do elemento em estudo têm influência na velocidade de propagação de ondas ultrassónicas. No entanto, e como já foi referido nos subcapítulos 3.4.3 e 3.4.4, a frequência dos transdutores tem influência no comprimento de onda e consequentemente na sua atenuação. A norma Inglesa BS 1881 [29] recomenda que as peças de betão ensaiadas por ultrassons cumpram uma distância lateral mínima, para que a velocidade da onda não sofra alterações. A Tabela 3.3 mostra as correspondências entre frequência dos transdutores, velocidade no betão e as dimensões laterais mínimas para que a velocidade de propagação não seja afetada. Entende-se por dimensão lateral mínima a distância mínima entre faces da peça de betão a ensaiar, na direção perpendicular à direção de propagação da onda. Na BS 1881 esta dimensão coincide com o comprimento de onda teórico da onda (equação 3.1).

Tabela 3.3 - Efeitos da dimensão do provete na propagação de ondas [29]

| Frequência do emissor de onda (kHz) | Velocidade de propagação no betão (m/s) | | |
|-------------------------------------|---|-----------|-----------|
| | Vc = 3500 | Vc = 4000 | Vc = 4500 |
| | Dimensão Lateral mínima (mm) | | |
| 24 | 146 | 167 | 188 |
| 54 | 65 | 74 | 83 |
| 82 | 43 | 49 | 55 |
| 150 | 23 | 27 | 30 |

3.5 Modos de geração e transmissão das ondas ultrassónicas

3.5.1 Equipamentos de geração e de receção de ondas ultrassónicas

O equipamento utilizado no ensaio dos ultrassons tem a capacidade de transformar um impulso elétrico em ondas mecânicas através de transdutores. Estas ondas são transmitidas ao material em estudo e, após a sua propagação, são recebidas por um recetor, isto é, um transdutor de funcionamento inverso (ver Figura 3.3).

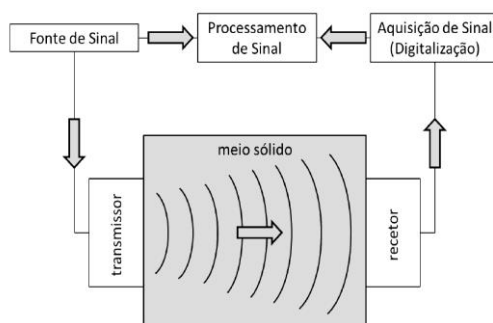


Figura 3.3 - Esquema de funcionamento de um aparelho de ultrassons [17]

Os transdutores, compostos por cristais piezoelétricos, podem gerar ondas de frequência entre os 24 kHz e os 200 kHz. Os mais utilizados são os transdutores com frequências de 24 kHz, 54 kHz e 80 kHz. A importância da escolha de frequência dos transdutores foi salientada nos subcapítulos 3.4.3, 3.4.4 e 3.4.8.

3.5.2 Posicionamento dos transdutores

Existem três maneiras diferentes de dispor os transdutores para leituras experimentais, representadas na Figura 3.4. O **Método Direto** representado na Figura 3.4 a) consiste na colocação dos transdutores com faces paralelas em superfícies opostas do material em ensaio. Este é o método que oferece melhores resultados, já que, de acordo com Bungey [7] a transmissão da energia do emissor para o material é feita na direção ortogonal à face do transdutor. O **Método Semidirecto**, representado na Figura 3.4 b), consiste na colocação dos transdutores em faces ortogonais mas adjacentes do material em ensaio. Este método também pode ter resultados satisfatórios desde que nem o ângulo δ entre os transdutores (Figura 3.4) nem a distância entre o centro das faces dos transdutores sejam excessivos. Neste tipo de transmissão o percurso realizado pela onda entre o centro dos transdutores não será, em princípio, exatamente linear. No entanto, por simplificação, considera-se o percurso linear. O **Método Indireto**, representado Figura 3.4 c), consiste na colocação dos transdutores numa mesma face do material a ensaiar. O percurso e o modo de propagação da propagação indireta é diferente das correspondentes na propagação direta, por isso as velocidades de propagação serão diferentes, não devendo ser comparadas. Neste tipo de transmissão a direção de emissão da onda é perpendicular ao seu percurso aparente (isto é, a linha que une os transdutores). Devido ao facto de ser uma propagação muito superficial, a velocidade de propagação vai ser bastante influenciada por ondas de superfície com velocidades inferiores às das ondas longitudinais (ver subcapítulo 2.2) e com trajetórias mais complexas. Este tipo de leituras deve ser utilizado quando está disponível apenas uma face do material em estudo para a deteção de defeitos ou para avaliação da profundidade de fendas, como se refere no capítulo seguinte.

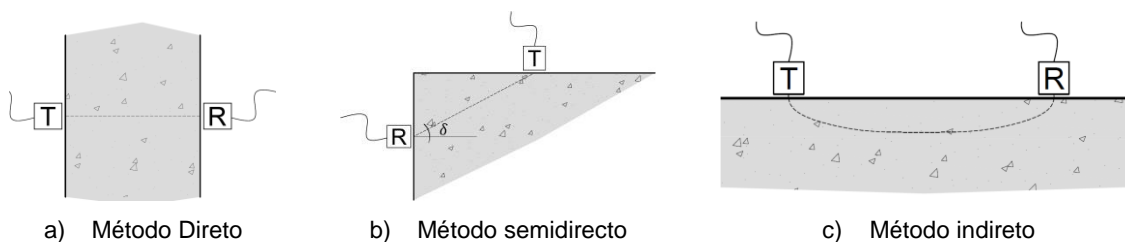


Figura 3.4 - Modos de disposição dos transdutores em ensaios de ultrassons

3.6 Métodos de cálculo de profundidade de fendas

Os métodos de cálculo de profundidade de fendas em estruturas de betão são do tipo indireto e têm em conta os princípios de propagação de ondas ultrassónicas quando estas encontram uma interface. No caso específico de uma fenda, está-se perante a interface de uma estrutura preenchida por ar, como referido no subcapítulo 2.3. Numa estrutura, quando existe uma interface deste tipo, a onda propagada não se transmite, podendo ser desviada ou refletida nessa fronteira, dependendo do tamanho da fronteira em comparação com o da estrutura [21].

Existem diversos métodos publicados para estimar a profundidade de fendas em estruturas, nomeadamente em estruturas de betão, os quais se apresentam de seguida. Estes métodos baseiam-se nos tempos de propagação de ondas e na sua relação com a distância à respetiva fenda. Estes métodos utilizam considerações geométricas simples e lineares para aproximar a trajetória de propagação das ondas ultrassónicas. Assim, os cálculos de profundidade de fendas apenas se podem considerar como estimativas e não como valores exatos.

3.6.1 Método proposto na norma British Standard “BS” (1986)

O método proposto na norma BS 1881 [29] para a medição da profundidade de uma fenda (h) baseia-se na medição de dois tempos de propagação, t_1 e t_2 , colocando o emissor e o recetor de ondas em posições pré-estabelecidas relativamente à fenda. O emissor e o recetor de onda são colocados sobre uma linha fictícia, perpendicular ao traço da fenda na superfície da estrutura, um de cada lado da fenda, a igual distância X da fenda, e determina-se o tempo de propagação t_1 . O tempo de propagação t_2 é determinado colocando o emissor e recetor de ondas ultrassónicas sobre essa mesma linha fictícia, ambos a uma distância dupla, $2X$, do traço da fenda na superfície da estrutura. Para este método é recomendado adotar para X o valor de 15 cm (Figura 3.5).

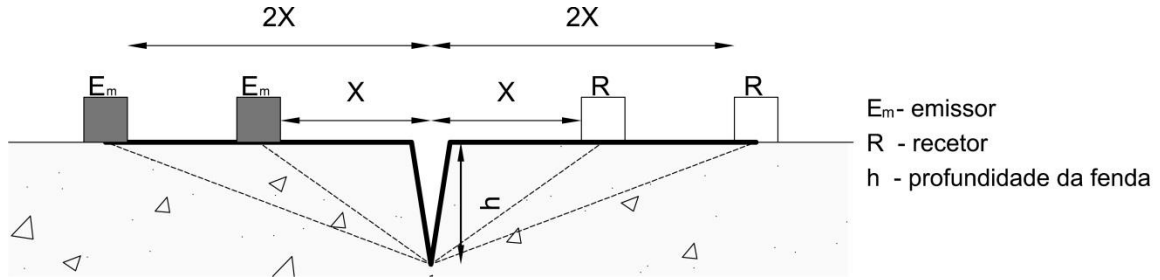


Figura 3.5 - Modelo proposto pela norma BS EN12504-4 [29]

Admitindo que o percurso de onda é feito pelo menor caminho linear, contornando a fenda, e admitindo uma velocidade de propagação V , é possível, por considerações geométricas, relacionar t_1 e t_2 com h e X :

$$t_1 = \frac{2\sqrt{X^2 + h^2}}{V} \quad 3.2$$

$$t_2 = \frac{2\sqrt{4X^2 + h^2}}{V} \quad 3.3$$

Resolvendo as duas equações em ordem à velocidade V , suposta igual em todo o domínio, e igualando ambos os resultados, obtém-se como estimativa de h :

$$h = X \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad 3.4$$

3.6.2 Método de Bungey (1989)

O método de Bungey (Figura 3.6) [7] utiliza duas leituras de tempo de propagação, designados por T_C e T_{SF} . Este último é o tempo de propagação da onda ultrassônica, medido com o emissor colocado a uma distância de $2X$ do receptor na mesma face da estrutura em estudo, tendo ainda o cuidado de não existir qualquer fenda ou defeito entre o emissor e o receptor. T_C é o tempo de propagação medido com o emissor e o receptor de ondas ultrassônicas colocados na mesma face da estrutura em estudo, sobre uma linha fictícia perpendicular ao traço da fenda, ambos à distância X da fenda com a profundidade h . Designando por L_C a distância percorrida pela onda em torno da fenda e por L_{SF} a distância percorrida pela onda no trajeto sem qualquer fenda ou defeito, e considerando uma velocidade comum de propagação de onda V , obtém-se, tendo em conta a geometria do problema, as seguintes expressões:

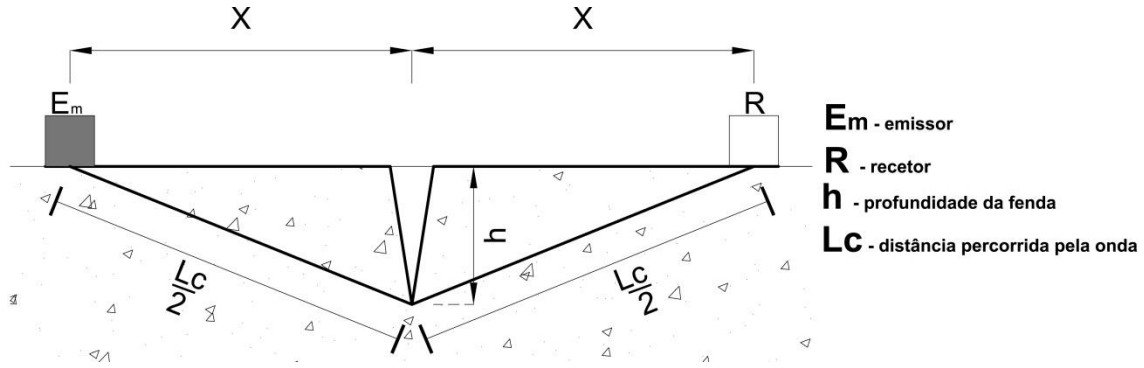


Figura 3.6 - Modelo Proposto por Bungey (1989) adaptado de [7]

$$L_{SF} = 2X \quad 3.5$$

$$L_C = 2\sqrt{X^2 + h^2} \quad 3.6$$

$$T_{SF} = \frac{2X}{V} \quad 3.7$$

$$T_C = \frac{2\sqrt{X^2 + h^2}}{V} \quad 3.8$$

Equacionando a igualdade das velocidades nas equações 3.7 e 3.8 obtém-se a seguinte equação para a estimativa da profundidade da fenda:

$$h = X \sqrt{\frac{T_C^2}{T_{SF}^2} - 1} \quad 3.9$$

Segundo Bungey [7] a precisão relativa deste método é de $\pm 15\%$. Este método tem a vantagem da sua fácil aplicação, pois, tal como o método proposto pelo British Standard Institute, apenas requer duas leituras para se obter uma estimativa da profundidade da fenda. No entanto, este método pode conduzir a valores errados de h , porque a leitura de T_{SF} pode não ser representativa da velocidade de propagação V no material da estrutura. De facto o recurso a apenas uma medição para determinar T_{SF} , introduzir incerteza na aplicação deste método. Medeiros [4] estabeleceu uma relação entre o valor de X e o valor da profundidade da fenda h , para se obterem valores dentro da precisão indicada por Bungey. De acordo com este autor, os valores de X deverão estar dentro do intervalo $h < X < 4h$, ou equivalente ao intervalo $\frac{X}{4} < h < X$.

3.6.3 Método T (1972)

O Método T utiliza diversas leituras ao longo de uma linha fictícia na superfície da estrutura, perpendicular ao traço da fenda na mesma superfície. São realizadas medições do tempo de propagação colocando o emissor e recetor do mesmo lado da fenda, ou colocando-os de tal modo que a fenda se encontre entre eles, como representado na Figura 3.7 e na Figura 3.8. A partir de considerações geométricas e dos tempos de propagação é possível estimar a profundidade da fenda, h [16, 21].

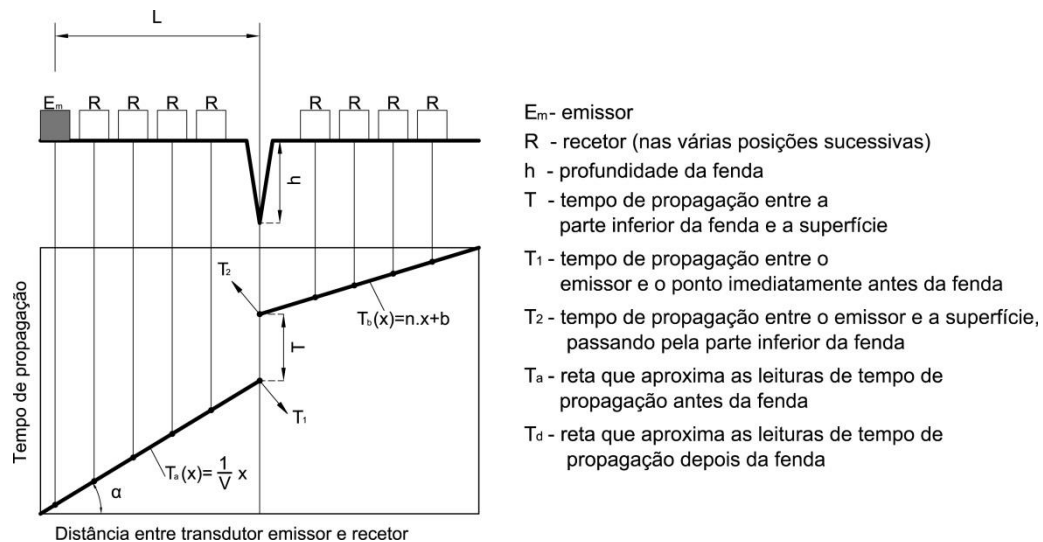


Figura 3.7 - Representação gráfica genérica para o Método T e para a versão simplificada do Método T [16]

Este método é utilizado para determinar a profundidade de fendas perpendiculares à superfície e despreza a espessura e eventuais irregularidades da fenda (Figura 3.7 e Figura 3.8), pelo que permite a aplicação do teorema de Pitágoras ao triângulo representado na Figura 3.8.

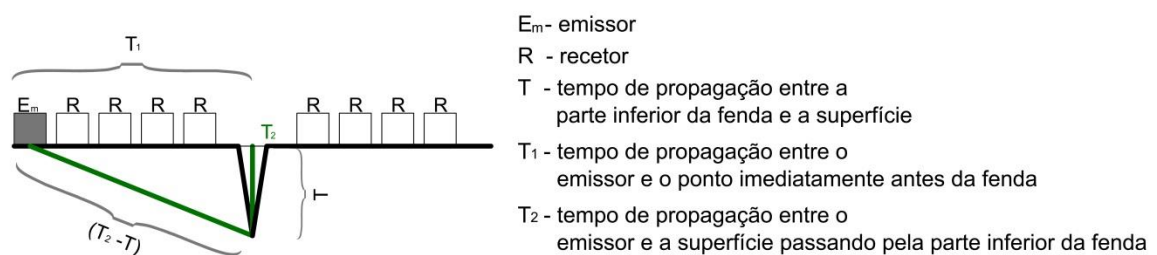


Figura 3.8 - Modelo geométrico para o Método T

Designando por T o tempo que a onda demora no percurso na parte inferior da fenda até à superfície, por T_1 o tempo de percurso do emissor até imediatamente antes da fenda, e $(T_2 - T)$ o

tempo que associado ao percurso desde o emissor à parte inferior da fenda, é possível estabelecer as seguintes igualdades:

$$h = TV \quad 3.10$$

$$L = T_1 V \quad 3.11$$

$$T_2 = \frac{L}{V} + T \quad 3.12$$

$$V = \cot \alpha \quad 3.13$$

Aplicando o teorema de Pitágoras ao triângulo da Figura 3.8 tem-se então:

$$T_1^2 + T^2 = (T_2 - T)^2 \Leftrightarrow T_2 - T = \sqrt{T_1^2 + T^2} \quad 3.14$$

Substituindo a equação 3.10 na equação 3.14 obtém-se, por sua vez:

$$\begin{aligned} \sqrt{T_1^2 + \left(\frac{h}{V}\right)^2} &= T_2 - \frac{h}{V} \Leftrightarrow T_1^2 + \frac{h^2}{V^2} = \left(T_2 - \frac{h}{V}\right)^2 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow T_1^2 + \frac{h^2}{V^2} = T_2^2 - 2T_2 \frac{h}{V} + \frac{h^2}{V^2} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow -2T_2 \frac{h}{V} = T_1^2 - T_2^2 \Leftrightarrow h = \frac{V(T_1^2 - T_2^2)}{-2T_2} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow h = \frac{VT_1}{2} \left(\frac{T_2}{T_1} - \frac{T_1}{T_2}\right) \end{aligned} \quad 3.15$$

Por último substituindo as equações 3.11, 3.12 e 3.13 na equação 3.15 obtém-se a expressão empírica utilizada no Método T [16, 21].

$$h = \frac{T \cot \alpha (T \cot \alpha + 2L)}{2(T \cot \alpha + L)} \quad 3.16$$

em que α é a inclinação do segmento de reta que se ajusta aos pares (d,T) antes da fenda (Figura 3.7).

Tendo em consideração os pares de valores obtidos experimentalmente (distância entre emissor e recetor e tempo de propagação), são calculadas duas equações da reta usando o método de regressão linear: i) uma correspondente aos pontos obtidos colocando o emissor e o recetor antes do traço da fenda, com a reta a passar na origem do gráfico, $T_a(x) = \frac{1}{V}x$, ii) outra correspondente aos pares de valores obtidos com o recetor colocado depois da fenda $T_d(x) = nx + b$ (Figura 3.7). O valor de T , que permite o cálculo da estimativa da profundidade de fenda, é dado pela descontinuidade em L das duas retas de ajustamentos.

$$T = T_d(L) - T_a(L) \quad 3.17$$

3.6.4 Versão simplificada do Método T – “Método L”

Pode obter-se uma estimativa de profundidade de fendas recorrendo a uma versão simplificada do Método T [16]. Nesta versão existem apenas pequenas diferenças na construção da expressão do cálculo da estimativa e na dedução da equação da reta após a fenda, já que neste método se admite a igualdade do declive das retas $T_d(x) = nx + b$ e $T_a(x) = \frac{1}{V}x$ (Figura 3.7), ou seja, admite-se que os valores da velocidade de propagação da onda antes da fenda e depois da fenda são iguais, tendo-se então $T_d(x) = \frac{1}{V}x + b$. Neste caso, o método de aproximação dos pontos das leituras obtidas após a fenda é feito através de uma regressão linear condicionada ao declive “V” já obtido para os pontos antes da fenda (ver equação 3.18). Nesta tese designar-se-á este método por “Método L”.

$$\overline{T_d} = V\overline{x} + b_{médio} \Leftrightarrow b_{médio} = \overline{T_d} - V\overline{x} \quad 3.18$$

sendo $\overline{T_d}$ o valor médio das leituras do tempo de propagação das ondas, \overline{x} o valor médio das distâncias entre emissor e recetor medido na horizontal,.

A fórmula utilizada neste método tem por base a expressão 3.15. Resolvendo a equação 3.11 em ordem a T_1 e substituindo o resultado na equação 3.15, obtém-se a expressão final:

$$h = \frac{L}{2} \left(\frac{T_2}{T_1} - \frac{T_1}{T_2} \right) \quad 3.19$$

com $T_1 = T_a(L)$ e $T_2 = T_d(L)$.

3.6.5 Método sugerido por Pinto, Medeiros e Padaratz (2007)

O método proposto por Pinto, Medeiros e Padaratz, em 2007 [22], surge no sentido de melhorar a precisão dos métodos de Bungey [7] e da British Standard [29], que, por apenas utilizarem duas leituras, propiciam a incertezas nos resultados. Estes autores desenvolveram um método gráfico que recorre a um maior número de leituras (pelo menos quatro) e que as relaciona com a profundidade da fenda.

São referidos dois métodos, desenvolvidos para duas situações distintas de localização da fenda na estrutura. Se a localização da fenda permitir colocar o emissor e recetor de ambos os lados da fenda sobre uma linha fictícia perpendicular ao traço da fenda na superfície da estrutura a distâncias da fenda sucessivamente maiores, utiliza-se o **método de afastamento sucessivo equidistante** representado na Figura 3.9. No caso de existir uma fenda numa zona próxima da extremidade da estrutura, deverá utilizar-se o **método de afastamento sucessivo linear**, representado na Figura 3.10.

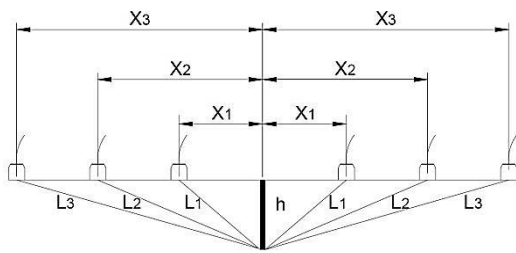


Figura 3.9 - Método de afastamento sucessivo equidistante [22]

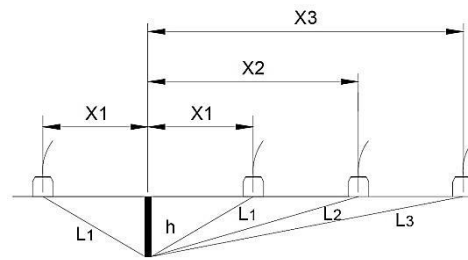


Figura 3.10 – Método de afastamento sucessivo linear [22]

Método de afastamento sucessivo equidistante

O método de afastamento sucessivo equidistante (Figura 3.9) tem por base o método da BS, apresentado no subcapítulo 3.6.1, utilizando, no entanto, um maior número de leituras. Neste modelo, o emissor e o recetor de ondas ultrassónicas são colocados à distância X_i da fenda em lados opostos, e são feitas pelo menos quatro leituras, ou seja, pelo menos mais duas leituras do que as utilizadas para o método da BS.

Admitindo que a velocidade de propagação das ondas é igual em todas as leituras, tem-se:

$$T_i = \frac{2L_i}{V} \quad 3.20$$

em que:

T_i – Tempo de propagação medido para o emissor-recetor de onda i

L_i – Percorso da onda desde o emissor à extremidade inferior da fenda (ver Figura 3.9)

V – Velocidade de propagação

Por considerações trigonométricas simples tem-se:

$$L_i = \sqrt{h^2 + X_i^2} \quad 3.21$$

Resolvendo a equação 3.20 em ordem a L_i e igualando este ao membro direito da equação 3.21 obtém-se a seguinte equação:

$$X_i^2 = \frac{V^2 T_i^2}{4} - h^2 \quad 3.22$$

Da equação 3.22 resulta uma relação linear entre X_i^2 e T_i^2 que pode ser representada graficamente com a reta de mínimos quadrados correspondente. O simétrico da ordenada na origem dessa reta será igual ao quadrado da profundidade da fenda que se pretende determinar, como ilustrado na Figura 3.11. Depois de obter experimentalmente os valores de T_i correspondentes aos valores de X_i , desenha-se um gráfico, como ilustra a Figura 3.11 e, por meio de uma regressão linear, obtém-se uma estimativa de h .

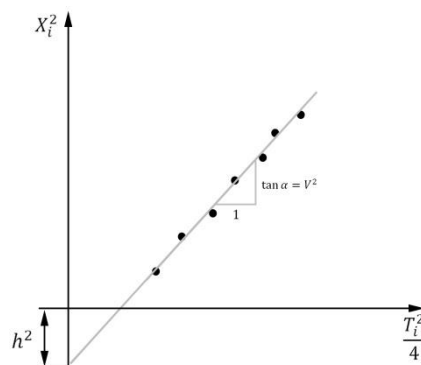


Figura 3.11 - Representação gráfica da análise dos resultados do método de afastamento sucessivo equidistante (adaptado de [22])

Método de afastamento sucessivo linear

Este modelo foi desenvolvido para adaptar o modelo de afastamento sucessivo equidistante à situação em que a fenda está localizada numa zona próxima da extremidade da estrutura. Usando as mesmas considerações geométricas do modelo anterior deduzem-se as seguintes equações:

$$T_1 = \frac{2L_1}{V} \quad 3.23$$

$$T_2 = \frac{L_1 + L_2}{V} \quad 3.24$$

$$T_i = \frac{L_1 + L_i}{V} \quad 3.25$$

$$L_1 = \sqrt{h^2 + X_1^2} \quad 3.26$$

$$L_i = \sqrt{h^2 + X_i^2} \quad 3.27$$

Subtraindo a equação 3.25 e a equação 3.23 consegue-se obter uma expressão para L_i em função da velocidade e do tempo de propagação:

$$L_i = V \left(T_i - \frac{T_1}{2} \right) \quad 3.28$$

Substituindo a equação 3.27 na equação 3.28 obtém-se:

$$\sqrt{h^2 + X_i^2} = V \left(T_i - \frac{T_1}{2} \right) \Leftrightarrow X_i^2 = V^2 \left(T_i - \frac{T_1}{2} \right)^2 - h^2 \quad 3.29$$

De forma semelhante ao descrito relativamente ao modelo de afastamento sucessivo equidistante, depois de obter experimentalmente os valores de T_i correspondentes aos valores de X_i desenha-se um gráfico com os valores obtidos, e, por meio de uma regressão linear, é possível obter uma estimativa de h (Figura 3.12).

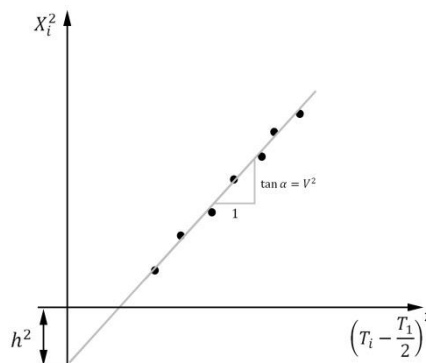


Figura 3.12 - Representação gráfica da análise dos resultados do método de afastamento sucessivo linear (adaptado de [22])

4 ENSAIOS COM ULTRASSONS EM PROVETES DE BETÃO

A atividade experimental desta tese consistiu na realização de ensaios em quatro provetes prismáticos de betão simples, aplicando algumas das técnicas mencionadas no capítulo anterior. Os objetivos idealizados para estes ensaios eram:

- i) caracterizar o betão constituinte dos provetes quando à sua homogeneidade e identificar a presença de defeitos nos provetes;
- ii) estimar o módulo de elasticidade dinâmico do betão a partir da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas e comparar com as estimativas obtidas em ensaios de compressão;
- iii) estimar a profundidade de fendas propositadamente induzidas nos provetes, de modo a verificar a aplicabilidade dos métodos estudados para o seu cálculo.

4.1 Resumo da atividade experimental

Numa primeira fase foram realizados ensaios em dois provetes, noutro âmbito, haviam sido moldados para realização de ensaios de ultrassons (provetes com dimensões de 20 x 20 x 60 cm, designados por V1 e V2). Não se dispunha de informação sobre o tipo e dimensão dos agregados, as características do betão e a data da moldagem. Na face superior de cada um destes provetes tinham sido criadas duas fendas superficiais, para posterior verificação da aplicabilidade dos métodos de cálculo de profundidade de fendas.

Já no âmbito da presente tese, ambos os provetes foram sujeitos a ensaios de propagação de ondas para identificar defeitos, verificar a homogeneidade no betão e para quantificar a profundidade de fendas. Algumas dificuldades no decorrer dos ensaios revelaram a necessidade de ensaiar novos provetes, onde fosse possível introduzir as fendas em locais específicos, mais vantajosos do ponto de vista experimental. De facto, as fendas nos provetes V1 e V2 situavam-se demasiado próximas entre si e dos bordos do provete, o que limitava o número de medições realizáveis para determinar a profundidade de cada uma das fendas. Nalguns casos ainda, a distância entre o emissor e o recetor era demasiado pequena, o que poderia influenciar os resultados. Verificou-se que com a configuração destas fendas impossibilitava o recurso a métodos de afastamento sucessivo equidistante para estimar a profundidade das fendas (ver

subcapítulo 3.6). Considerou-se também que seria interessante dispor de mais leituras para melhorar a análise da homogeneidade do betão e para ter uma amostra de maior dimensão.

Foram então ensaiados, numa segunda fase experimental, outros dois provetes com dimensões idênticas às dos anteriores. Estes provetes, designados por V3 e V4, eram provetes moldados em novembro de 2011 para ensaios de deformabilidade do betão da nova barragem do Alto Ceira, no Núcleo de Betões do Departamento de Materiais (DM) do LNEC. Dispunha-se de informação relativa à classe do betão, C16/20, e à composição do betão. Os ensaios de deformabilidade não se chegaram a realizar, por isso não se dispunha de informação relativa ao módulo de elasticidade. Para tornar possível a realização dos ensaios de determinação de profundidade de fendas foram induzidas duas fendas em cada um dos provetes:

- i) uma fenda central numa face retangular 20x60cm para melhor aplicação dos métodos de afastamento sucessivo equidistante;
- ii) uma fenda na face retangular oposta apenas a 20 cm de uma das extremidades do provete, para aplicação dos métodos de afastamento sucessivo linear (subcapítulo 4.3).

As fendas foram induzidas com meios mecânicos, recorrendo a uma serra de aço própria. No provete V3 a fenda central tinha a profundidade de 2,5 cm e a fenda na face oposta 5 cm de profundidade. No provete V4 optou-se, inversamente, por criar uma fenda central com uma profundidade de 5 cm e na face oposta somente com 2,5 cm. A abertura de todas as fendas era de 3 mm de abertura. Como se detalhará na sequência, a análise dos resultados obtidos nos ensaios efetuados nos provetes V3 e V4 permitiu concluir que os métodos de cálculo utilizados conduziram a estimativas de melhor precisão para fendas mais profundas. Assim, após a realização dos ensaios de ultrassons nestas vigas e para confirmar essa observação, as fendas de 5 cm foram prolongadas para 7 cm. Estes provetes, com novas fendas de 7 cm, foram designados de V3.1 e V4.1. O programa experimental seguido nos provetes V3 e V4 foi igualmente implementado nestes provetes com fendas corrigidas.

Em algumas leituras, a distância entre transdutores foi inferior a 150 mm, pelo que, tendo em conta o referido no subcapítulo 3.4.8, os provetes foram ensaiados utilizando frequências de emissão de 24 kHz e de 54 kHz.

De modo a verificar a aplicabilidade dos resultados dos ensaios de ultrassons na estimativa do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes de betão, os resultados obtidos foram comparados

com o módulo de elasticidade experimental obtido em ensaios de compressão efetuados posteriormente em carotes cilíndricas extraídas dos provetes.

4.2 Equipamento de ensaio

Nos ensaios de ultrassons foi utilizado o aparelho PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) que tem a capacidade de gerar um conjunto de impulsos elétricos transformando-os em sucessivas ondas mecânicas P no transdutor-emissor, as quais atingem o provete através do contacto com a superfície do mesmo. As ondas mecânicas atravessam o meio de propagação e são recebidas pelo transdutor-recetor, que opera a transformação inversa, isto é, transforma as ondas em sinais elétricos. O recetor, ao captar a primeira onda emitida, provoca a paragem de um dispositivo de relógio, permitindo registar o tempo do percurso da onda t [7]. A precisão do tempo registado, indicado no visor digital, é de $0,1 \mu s$. O equipamento dispõe de uma barra de calibração, referência para a medição dos tempos de propagação (Figura 4.1).

De maneira a melhorar o contacto dos transdutores (emissor e recetor) com o provete foi aplicada massa consistente entre as superfícies dos transdutores e a superfície do material. Este produto ajuda a minimizar os vazios entre os dois tipos de superfícies, permitindo, assim, melhorar a transmissão das ondas.

O equipamento dispõe de transdutores de 24, 37 e de 54 kHz, de forma cilíndrica com diâmetro de 5 cm no contacto. Nos ensaios foram utilizados os transdutores de 24 e de 54 kHz.

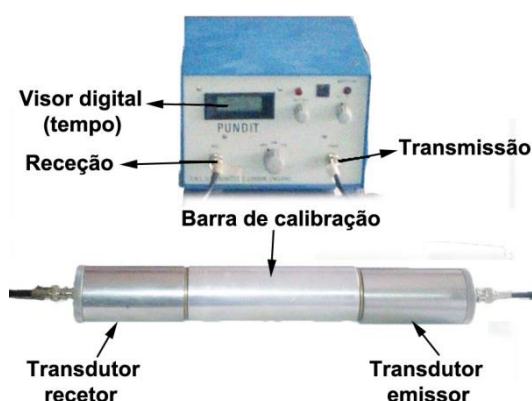


Figura 4.1 – Equipamento PUNDIT utilizado nos ensaios

4.3 Características dos provetes de betão ensaiados

Como já foi referido, foram ensaiados quatro provetes de betão simples com dimensões de 20 x 20 x 60 cm, designados por V1, V2, V3 e V4. Dos provetes V1 e V2 não se dispunha de nenhuma informação sobre as características do betão. Dos provetes V3 e V4 apenas se dispunha de informação relativa à idade, composição e classe do betão. Em cada provete foram abertas fendas superficiais com diferentes profundidades, de maneira a aferir os métodos de estimativa da respetiva profundidade, recorrendo aos ensaios de ultrassons. Nos provetes V1 e V2 as fendas foram induzidas durante a moldagem, com um negativo. Nestes provetes ambas as fendas foram inseridas numa mesma face de largura 20 cm. Nos provetes V3 e V4 as fendas foram abertas, também nas faces de largura igual a 20 cm, recorrendo a uma serra de corte com lâmina de aço. O processo de corte das fendas foi acompanhado da incidência dum jacto de água, para evitar o excessivo aumento de temperatura na serra. Para secar esta água, os provetes V3 e V4 foram colocados numa estufa a 40 °C durante 24 horas. Nestes provetes, a localização das fendas foi criteriosamente escolhida. Nos Provetes V3 e V4 foi feita uma fenda central numa das faces retangulares e uma fenda próxima ao bordo do provete na face oposta. Esta dimensão teve em conta o diâmetro dos transdutores. Todos os provetes estavam armazenados em condições laboratoriais, ou seja, com uma classe de exposição baixa e controlada. Em todas as faces dos provetes foi definida uma malha quadrada de 5 cm, para posicionamento dos transdutores.

Provetes V1 e V2

Na Figura 4.2 apresentam-se fotografias dos provetes V1 e V2, já com a malha quadrada desenhada. Uma análise visual revela que, à exceção da deterioração nos cantos, os provetes aparentam estar em boas condições. Não se observam outros defeitos para além das fendas induzidas durante a betonagem dos provetes, através de negativos metálicos, retirados antes da presa do betão. As profundidades de fendas dos dois provetes eram distintas: o provete V1 com fendas de 2 e de 5 cm e o provete V2 com fendas de 7 e de 9,5 cm. As superfícies dos provetes foram polidas de maneira a melhorar a qualidade do contacto dos transdutores. Os provetes apresentam duas saliências em duas faces laterais, identificadas na Figura 4.2, o que dificultava a colocação dos transdutores nas mesmas. A implementação da malha quadrada de 5 cm foi dificultada pelo facto das dimensões dos provetes e as distâncias das fendas aos topos dos provetes V1 e V2 não serem múltiplos de 5 cm.

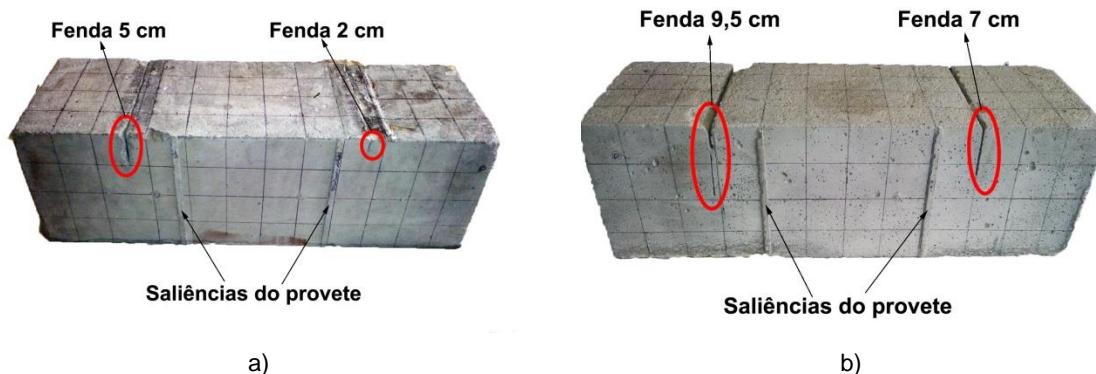


Figura 4.2 - Provete V1 (a) e V2 (b)

Provete V3 e V4

Na Figura 4.3 apresentam-se fotografias dos provetes V3 e V4, já com a malha de 5 cm x 5 cm desenhada. Estes provetes foram moldados com betão de classe C 16/20, com a composição teórica indicada na Tabela 4.1. Este betão é uma amostra extraída do betão colocado em obra a envolver os grupos de extensómetros da barragem instalados com o objetivo de medir as deformações. Tendo em conta a dimensão dos extensómetros, este betão é crivado pelo peneiro de 38 mm, de modo a que os erros de medição sejam minimizados, razão pela qual a dimensão máxima do seu agregado não excede 38 mm. Os provetes aparentavam boas condições de conservação, com exceção da deterioração nos cantos, possivelmente devido ao transporte desde a barragem até ao LNEC. Não foi necessário polir as superfícies dos provetes, pois já se encontravam suficientemente regulares para os ensaios com ultrassons.

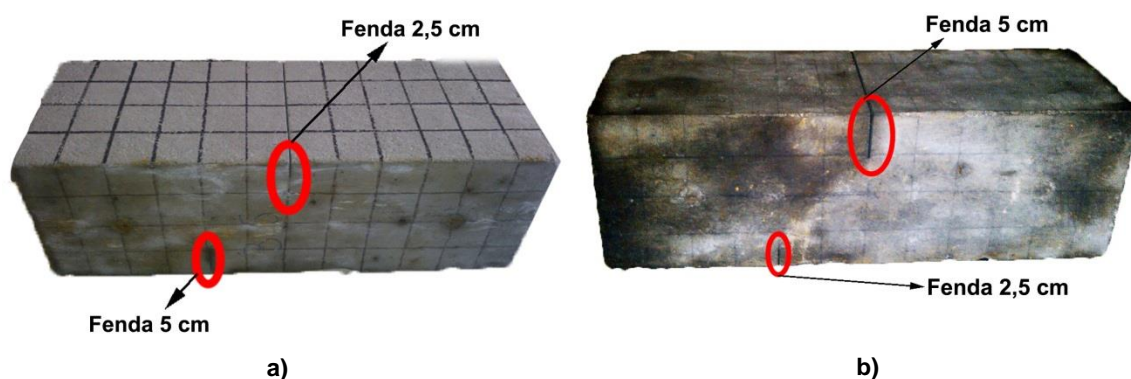


Figura 4.3 - Provete V3 (a) e V4 (b)

As dimensões dos provetes são certas à unidade e a distância das fendas aos topos foram definidas de modo a coincidir com a malha quadrada de 5 cm. Uma das fendas, localizada numa face retangular do provete, encontra-se no centro da mesma permitindo um maior número de leituras nos ensaios de afastamento equidistante. A outra fenda, localizada na face oposta do

proвете encontra-se mais próxima da extremidade permitindo mais leituras no ensaio de afastamento linear (ver subcapítulo 3.6).

Tabela 4.1 - Composição teórica do betão nos provetes V3 e V4

| Componente do betão | Quantidade (kg/m ³ de betão) |
|----------------------|--|
| Cimento CEM I 42.5 R | 117 |
| Cinzas | 143 |
| Areia 0/4 | 776 |
| Brita 4/8 | 196 |
| Brita 8/16 | 236 |
| Agregado 16/31,5 | 311 |
| Agregado 31/63 | 451 |
| Adjuvante pozzolith | 2,08 |
| Água | 151 |

Na Figura 4.4 apresentam-se, de forma esquemática, as dimensões de todos os provetes ensaiados e a localização e profundidade das fendas. Na mesma figura é indicado o sistema de eixos adotado neste trabalho. Na Tabela 4.2 apresentam-se as dimensões, massa seca e massa volúmica de cada provete ensaiado bem como a profundidade das fendas. As dimensões foram registadas com a precisão de ± 1 mm, e a massa foi registada com a precisão de $\pm 0,1$ kg.

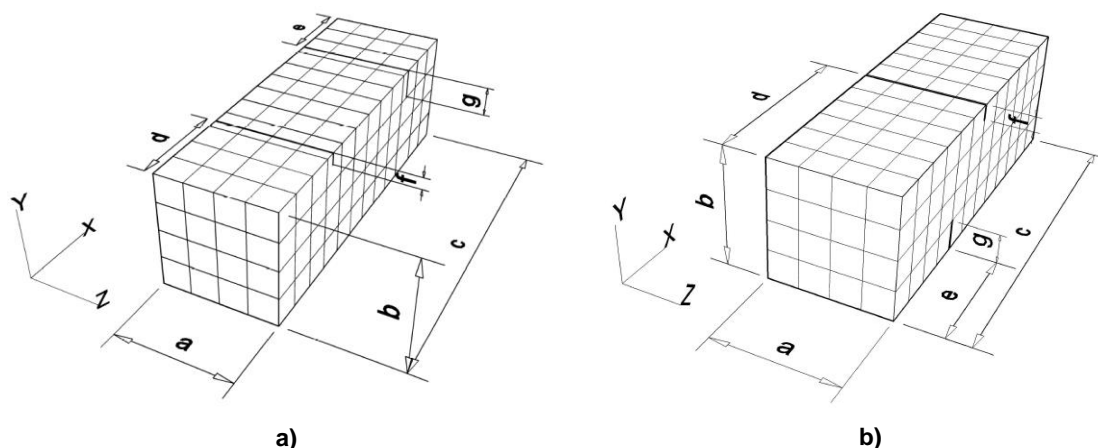


Figura 4.4 - Dimensões genéricas dos provetes: V1e V2 (a); V3 e V4 (b)

Tabela 4.2 - Características dos provetes de betão

| | Dimensões (cm) | | | | | Massa seca (kg) | Fendas (cm) | | Massa Volúmica (kg/m ³) |
|------|----------------|------|------|------|------|-----------------|-------------|-----|-------------------------------------|
| | a | b | c | d | e | | f | g | |
| V1 | 20,1 | 20,2 | 61,6 | 16,8 | 14,3 | 55,4 | 2 | 5 | 2215 |
| V2 | 20,1 | 20,2 | 61,6 | 15,2 | 14,6 | 48 | 7 | 9,5 | 1919 |
| V3 | 20 | 20 | 60 | 30 | 20 | 56 | 2,5 | 5 | 2333 |
| V4 | 20 | 20 | 60 | 30 | 20 | 56 | 5 | 2,5 | 2333 |
| V3.1 | 20 | 20 | 60 | 30 | 20 | 56 | 2,5 | 7 | 2333 |
| V4.1 | 20 | 20 | 60 | 30 | 20 | 56 | 7 | 2,5 | 2333 |

4.4 Ensaios de propagação direta de ultrassons para a caracterização dos provetes

De forma a verificar a homogeneidade e detetar defeitos nos provetes foram efetuadas leituras diretas de ondas ultrassónicas, registando os tempos de propagação e calculando as respetivas velocidades aparentes. Como referido no subcapítulo anterior, definiu-se uma malha quadrada com a dimensão do diâmetro dos transdutores utilizados, 5 cm. As dimensões da malha devem ser adotadas consoante o tamanho do provete [16]. Considerou-se que uma malha de 5 cm seria adequada para a caracterização dos provetes. Na Figura 4.5 encontra-se ilustrada a disposição da malha adotada bem como a referência numérica de cada uma das suas quadrículas. A cada quadrícula da malha corresponde uma posição (centrada) possível do transdutor.

Para as leituras diretas nos provetes V1 e V2 colocaram-se os transdutores, em faces opostas, centrados nas quadrículas, e registaram-se os valores do tempo de propagação. As leituras entre as faces mais afastadas designam-se por leituras na direção x, e as leituras entre as faces mais próximas designam-se por leituras na direção z (Figura 4.5). Obtiveram-se 16 leituras na direção x e 48 leituras na direção z.

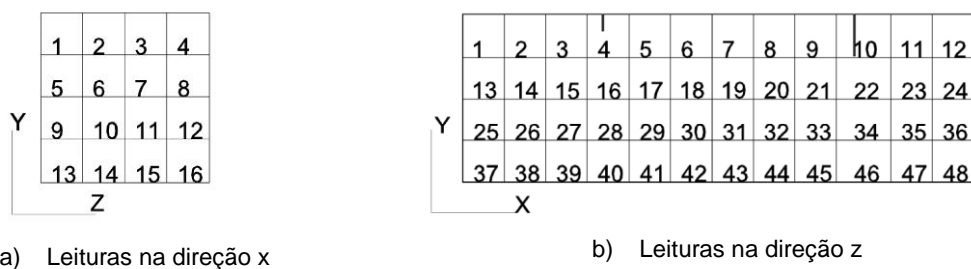


Figura 4.5 - Numeração das quadrículas da malha na face do transdutor-emissor

Nos provetes V3 e V4 foram efetuadas leituras adicionais, de modo a obter mais valores de velocidades de propagação e melhorar a caracterização dos provetes. Estas leituras adicionais consistem na combinação de leituras na direção x entre todas as quadrículas. Assim, para cada quadrícula foram realizadas 16 leituras. Esta combinação apenas foi feita para as leituras na direção x, pois é nesta direção que as leituras cruzam as fendas. Este tipo de leituras será aqui designado por semi-direta, de acordo com a norma EN 12504-4 (2007) [12]. Obtiveram-se assim 256 leituras na direção x e 48 leituras na direção z.

Após a realização dos ensaios nos provetes V3 e V4, as fendas de 5 cm foram aumentadas para 7 cm, recorrendo de novo à serra mecânica. Foram repetidas todas as leituras, com exceção das leituras diretas na direção z por se considerar que não iriam sofrer alterações, (pois as fendas

são segundo esta direção). Os provetes com as fendas de 7 cm, designados por V3.1 e V4.1, foram sujeitos a novas leituras com os transdutores de 24 kHz e de 54 kHz de modo a verificar a possível influência da frequência dos transdutores nos tempos experimentais de propagação e estimativa de profundidade de fendas.

Na Tabela 4.3 apresentam-se, para cada provete, o número de leituras efetuadas em cada direção, as velocidades mínimas, máximas e médias calculadas, o desvio padrão e o coeficiente de variação (razão entre o desvio padrão da amostra e o seu valor médio). Na coluna de identificação do provete é também indicada a frequência dos transdutores utilizados no ensaio.

Tabela 4.3 – Número de leituras diretas e semi-diretas realizadas em cada provete, segundo as direções x e z, e valores mínimo, máximo, média, desvio padrão e coeficiente de variação da velocidade de propagação

| Leituras diretas e semi-diretas | | | | | | | | |
|---------------------------------|----------------|-----------|----------|--------------------------------|--------|-------|---------------|--------|
| Provete | Nº de leituras | | | Velocidade de propagação (m/s) | | | | CV (%) |
| | Direção x | Direção z | Nº Total | Mínimo | Máximo | Média | Desvio padrão | |
| V1 (24kHz) | 16 | 48 | 64 | 4034 | 4441 | 4288 | 106 | 2,5 |
| V2 (24kHz) | 16 | 48 | 64 | 3306 | 3957 | 3633 | 118 | 3,6 |
| V3 (24kHz) | 256 | 48 | 304 | 3934 | 4172 | 4079 | 45 | 1,1 |
| V3.1 (24kHz) | 256 | 0 | 256 | 3824 | 4184 | 4073 | 58 | 1,4 |
| V3.1 (54 kHz) | 256 | 0 | 256 | 3839 | 4184 | 4054 | 61 | 1,5 |
| V4 (24kHz) | 256 | 48 | 304 | 4252 | 4445 | 4366 | 28 | 0,6 |
| V4.1 (24 kHz) | 256 | 0 | 256 | 4231 | 4427 | 4351 | 33 | 0,8 |
| V4.1 (54 kHz) | 256 | 0 | 256 | 4237 | 4486 | 4355 | 36 | 0,8 |

A comparação dos valores de velocidade mínima, média e máxima revela uma diferença de qualidade do betão dos vários provetes. O provete V2 apresenta os valores mais baixos de velocidade de propagação, e a maior dispersão de valores. O provete V4 apresenta os valores médios de velocidade de propagação mais elevados, e o desvio padrão mais baixo. Verifica-se, curiosamente, uma diferença de velocidade de propagação de cerca de 300 m/s entre os provetes V3 e V4, apesar da igual constituição de ambos.

4.4.1 Caracterização dos provetes quanto à presença de defeitos recorrendo à velocidade de propagação de ondas ultrassónicas

Uma vez que aos defeitos no betão correspondem zonas de menor densidade ou até mesmo vazios, nestes ensaios pretende-se utilizar a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas para a deteção das fendas introduzidas nos provetes de betão e, portanto, já conhecidas.

As fendas influenciam o tempo de propagação das ondas ultrassónicas apenas na direção x. Assim, nos provetes V3.1 e V4.1 não foram realizadas leituras diretas na direção z, pois admite-se que, de uma maneira geral, os resultados obtidos seriam iguais aos obtidos nos provetes V3 e V4. Só se fez a comparação dos resultados com os transdutores de 24 kHz e de 54 kHz nos provetes V3.1 e V4.1. Para as velocidades obtidas em todos os provetes (3306-4486 m/s) o comprimento de onda encontra-se entre 150 mm e 187 mm para a frequência de 24 kHz, cumprindo as condições referidas no subcapítulo 3.4.8, visto que a dimensão lateral do provete é de 200 mm. Para o caso dos transdutores de 54 kHz, os limites daquele intervalo são 67 mm e 83 mm, pelo que automaticamente as condições estão verificadas.

De maneira a detetar os defeitos nos provetes de betão utilizando as leituras diretas e semi-diretas realizadas, utilizaram-se duas ferramentas de representação gráfica. As leituras diretas foram apresentadas graficamente através de um mapeamento de isolinhas de velocidade de propagação. Nesta representação encontram-se as leituras na direção x e na direção z com a identificação das fendas e identificação da malha utilizada nos ensaios. Para as leituras semi-diretas, nos provetes V3, V4, V3.1 e V4.1 foi utilizado um sistema diferente. Recorrendo a um programa de desenho assistido, foram traçadas linhas coloridas com a trajetória direta entre os transdutores. A cada cor de linha corresponde um intervalo de velocidades de propagação. Nesta representação são visíveis, em tons de cinzento, três das faces dos provetes e as duas fendas representadas à escala.

Na Figura 4.6 apresentam-se as velocidades de propagação das ondas nos ensaios de propagação direta nas direções x e z nos provetes V1 e V2. Na mesma figura representa-se também a geometria das fendas existentes nos provetes. A análise das figuras permite verificar que em ambos os provetes as velocidades de propagação das ondas, na direção x, são menores na proximidade da face superior do provete, onde se encontram as fendas. As velocidades de propagação aumentam à medida que se afastam desta zona. No provete V1, na direção z (Figura 4.6 b), também se verifica que as velocidades de propagação são menos elevadas, neste caso, sem a presença de qualquer fenda nesta direção de propagação.

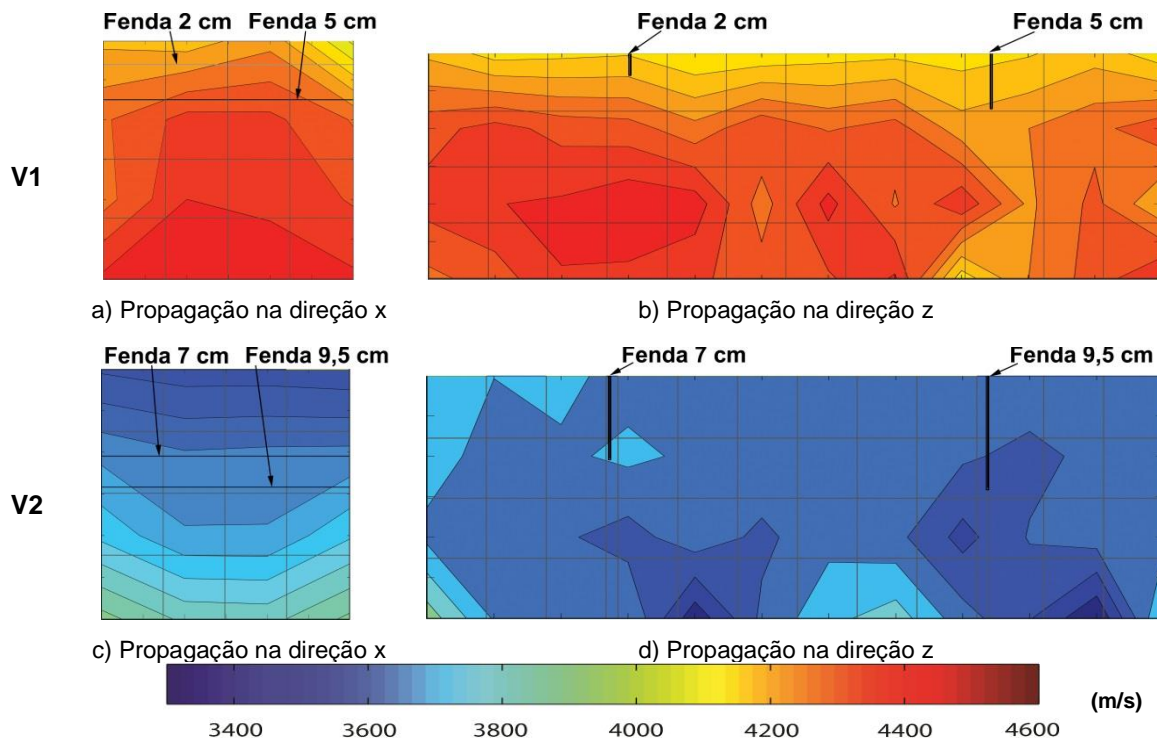


Figura 4.6 – Isolinhas das velocidades de propagação direta das ondas ultrassónicas nos provetes V1 e V2.

No provete V2 na direção z (Figura 4.6 d)) existe uma zona próxima da fenda de 9,5 cm com velocidades de propagação mais baixas, que poderá indicar a presença de um defeito ou heterogeneidade desconhecidos no provete de betão.

No provete V3 (Figura 4.7 a) e b)), os valores das velocidades de propagação variam de forma radial, diminuindo do centro para a periferia. Na direção x é evidente que a velocidade de propagação é mais elevada na zona não influenciada pela presença de fendas, e afastada das faces do provete. No provete V4 (Figura 4.7 c)) a presença das fendas não é notória nas leituras diretas na direção x.

A análise dos valores de velocidade obtidos nas leituras semi-diretas nos provetes V3 e V4 (Figura 4.8 e Figura 4.9), permite obter alguma informação adicional. As cores foram definidas tendo em conta as utilizadas na escala de velocidades das leituras diretas, embora com diferentes intervalos de valores. Analisando as figuras é visível a variação radial das velocidades de propagação, aumentando da zona exterior do provete onde se determinaram as velocidades mais baixas, para a zona interior do provete, onde se registam as velocidades mais elevadas. É interessante verificar que as velocidades de propagação mais elevadas são obtidas para trajetórias que não intercetam as fendas.

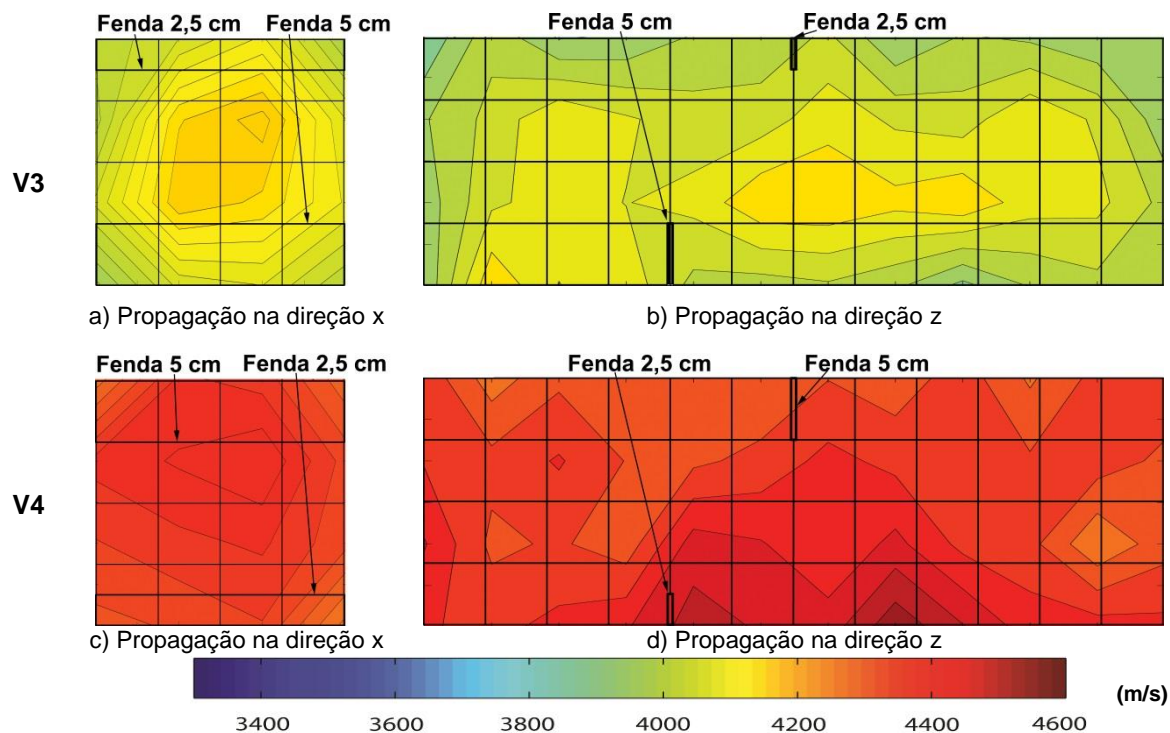


Figura 4.7 - Isolinhas das velocidades de propagação das ondas ultrassônicas nos provetes V3 e V4

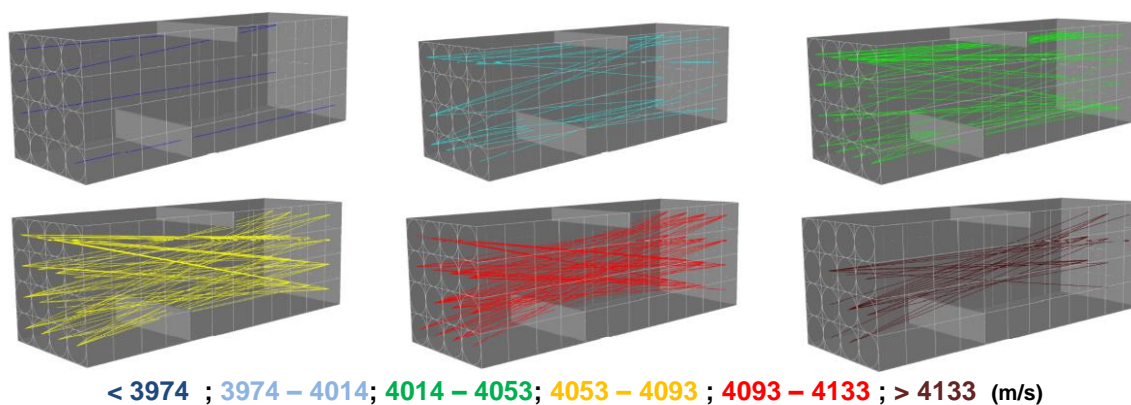


Figura 4.8 – Velocidade de propagação nas leituras semi-diretas no provete V3 (direção x)

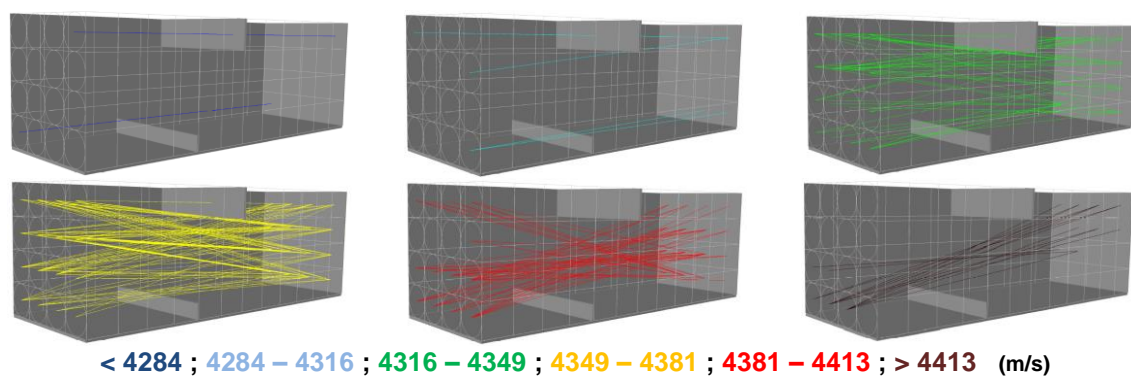


Figura 4.9 – Velocidade de propagação nas leituras semi-diretas no provete V4 (direção x)

Na Figura 4.10 apresentam-se as isolinhas das velocidades de propagação direta das ondas ultrassônicas nos provetes V3.1 e V4.1, obtidas utilizando os transdutores de 24 kHz e de 54 kHz. No caso dos provetes V3.1 e V4.1, a presença da fenda de 7 cm, apesar da sua profundidade ser superior ao diâmetro do transdutor (5 cm), não se torna evidente nas leituras diretas (Figura 4.10 a) e c)). Como já foi referido anteriormente, observa-se que as velocidades de propagação não variam com a alteração da frequência dos transdutores. Nas leituras semi-diretas realizadas nos provetes V3.1 e V4.1 (Figura 4.11, Figura 4.12) é visível o afastamento das linhas de velocidades de propagação mais elevadas da zona de aprofundamento da fenda. Consta-se também o aumento do número de velocidades menos elevadas determinadas na zona das fendas de 7 cm, evidenciando a sua presença.

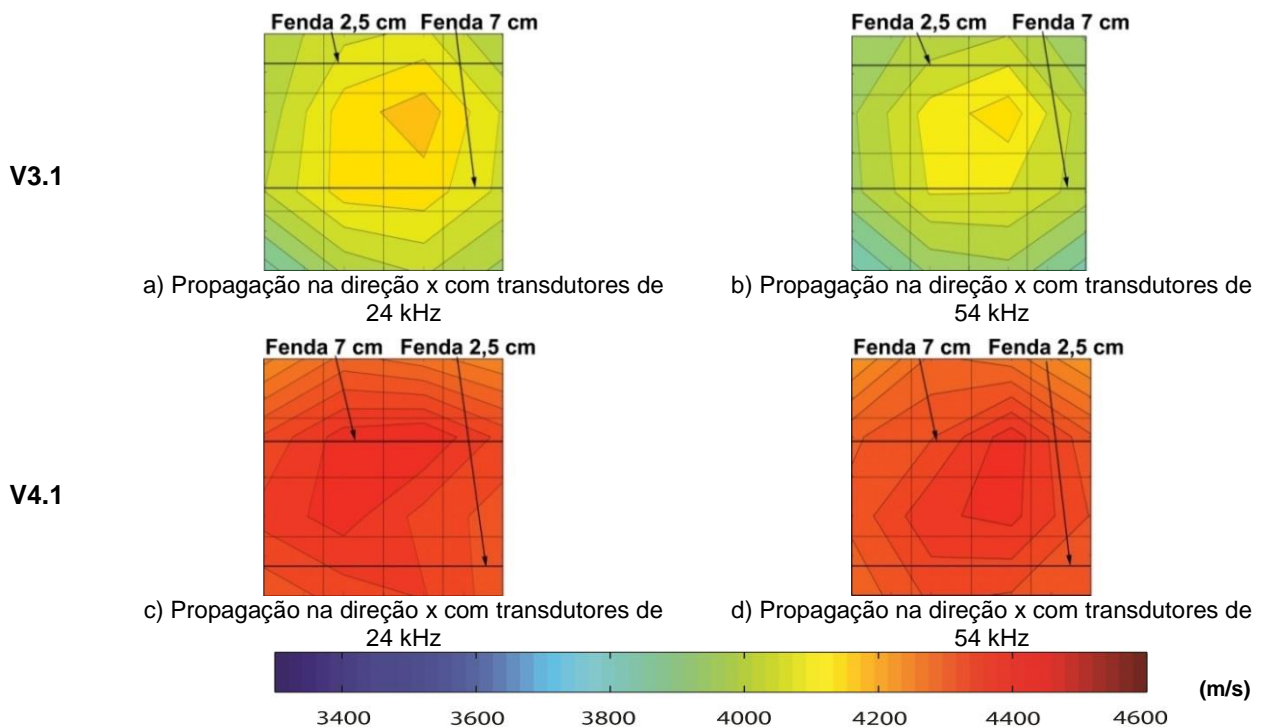


Figura 4.10 - Isolinhas das velocidades de propagação direta das ondas ultrassônicas nos provetes V3.1 e V4.1

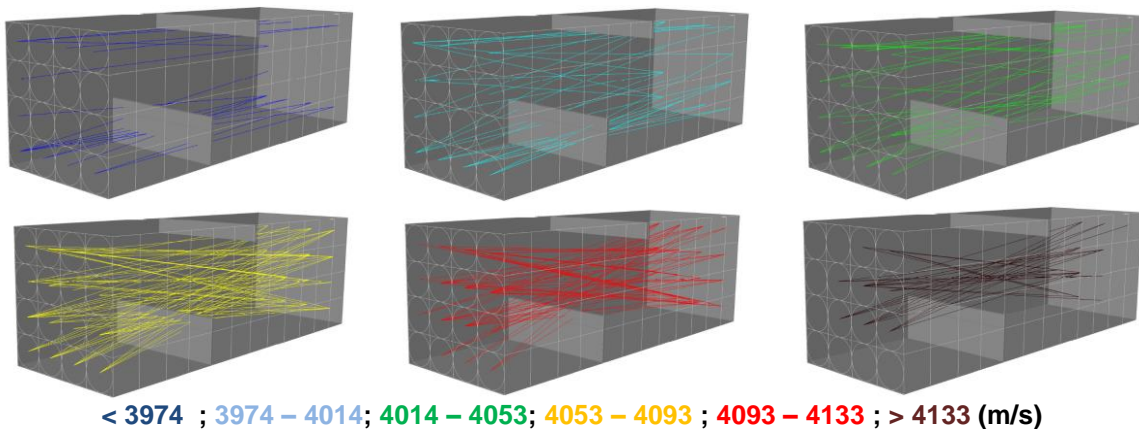


Figura 4.11 - Velocidade de propagação nas leituras semi-diretas no provete V3.1 para transdutores de 24 kHz (direção x)

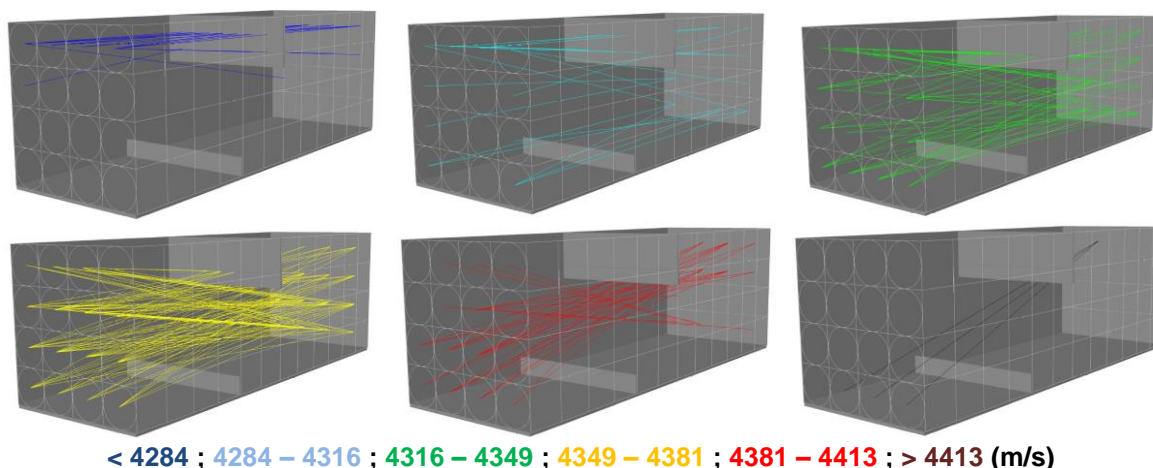


Figura 4.12 - Velocidade de propagação nas leituras semi-diretas no provete V4.1 para transdutores de 24 kHz (direção x)

4.4.2 Verificação da homogeneidade do betão

Na análise da homogeneidade do betão dos provetes considerou-se que só seria adequado considerar as leituras que não fossem diretamente influenciadas pelas fendas. Para identificar as leituras a descartar, utilizou-se um programa de desenho assistido para traçar linhas, simulando as trajetórias de propagação de ondas admitindo um percurso reto, desde o centro do emissor até ao centro do recetor. Na direção x não foram consideradas as leituras diretas e semi-diretas que interseitassem as fendas, e na direção z, não foram consideradas as leituras em que a quadrícula da malha estivesse em contacto com as fendas. Considerou-se, assim, uma amostra reduzida, para a caracterização da homogeneidade do betão dos provetes ensaiados. Na Tabela 4.4 apresentam-se, para cada provete, o número de leituras considerado em cada amostra, as velocidades mínima, média e máxima, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Da análise do valor do coeficiente de variação conclui-se que todos os provetes são homogêneos, pois os desvios percentuais em relação à média atingem valores inferiores a 3,1 %.

Tabela 4.4 - Número de leituras diretas e semi-diretas realizadas em cada provete, valores mínimo, máximo, média, desvio padrão e coeficiente de variação da velocidade de propagação

| | Nº de leituras total | Velocidade de propagação (m/s) | | | | CV (%) |
|---------------|----------------------|--------------------------------|--------|-------|---------------|--------|
| | | Mínimo | Máximo | Média | Desvio padrão | |
| V1 (24KHz) | 53 | 4102 | 4441 | 4301 | 103 | 2,4 |
| V2 (24KHz) | 52 | 3306 | 3957 | 3661 | 112 | 3,1 |
| V3 (24KHz) | 208 | 3964 | 4172 | 4096 | 41 | 1,0 |
| V3.1 (24KHz) | 159 | 3910 | 4166 | 4091 | 47 | 1,1 |
| V3.1 (54 KHz) | 159 | 3905 | 4184 | 4069 | 55 | 1,4 |
| V4 (24KHz) | 192 | 4313 | 4445 | 4369 | 25 | 0,6 |
| V4.1 (24 KHz) | 144 | 4266 | 4427 | 4363 | 31 | 0,7 |
| V4.1 (54 KHz) | 144 | 4267 | 4429 | 4363 | 33 | 0,8 |

4.5 Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dos provetes

Como já referido no subcapítulo 2.2, a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas relaciona-se diretamente com o módulo de elasticidade dinâmico do meio de propagação. Resolvendo a equação 2.7 em ordem ao módulo de elasticidade dinâmico obtém-se:

$$E_d = \frac{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}{1 - \nu_d} \rho V^2 \quad 4.1$$

O coeficiente de Poisson, ν , é um valor que no betão pode variar entre 0,11 e 0,25 [10]. Para efeitos de análise e cálculo estrutural no betão armado admite-se correntemente que este coeficiente toma o valor de 0,2. Para a determinação do módulo de elasticidade estático a admissão deste valor é considerada uma estimativa grosseira [30], e para provetes com peso volúmico de 2,5 t/m³ a variação induzida no valor calculado de E_d pode ser da ordem dos 5 GPa a que corresponde uma variação da velocidade de propagação próxima dos 200 m/s. Neste trabalho procura-se determinar o módulo de elasticidade a partir dos ensaios de ultrassons, pelo que é necessário dispor de um valor de ν tão correto quanto possível. Assim, considerou-se importante a determinação experimental do coeficiente de Poisson para a estimativa do módulo de elasticidade.

4.5.1 Determinação experimental do módulo de elasticidade através de ensaios de compressão

Após a conclusão dos ensaios com ultrassons, obteve-se experimentalmente o módulo de elasticidade de cada provete recorrendo a ensaios de compressão em máquina rígida. Para evitar a influência da presença das fendas nestes ensaios, foram retiradas, dos provetes prismáticos, carotes cilíndricas com 125 mm de diâmetro e 360 mm de altura.

Para a determinação do módulo de elasticidade foram colocados dois alongâmetros na superfície lateral das carotes cilíndricas em duas posições diametralmente opostas e centrais (Figura 4.13), e executados três ciclos de carga/descarga. Nas carotes cilíndricas retiradas dos provetes V1, V3 e V4, o valor máximo de carga foi de 84,1 kN (cerca de 1/3 da carga de rotura estimada do provete) e o valor mínimo de 11,9 kN. Suspeitando-se que o provete V2 apresentaria resistência inferior, foram realizados ensaios de determinação da resistência à compressão no mesmo. Tendo em conta os resultados dos ensaios, para o provete V2, utilizou-se 63,6 kN para o valor máximo da carga e 11,9 kN para o valor mínimo. No último ciclo registou-se o valor da variação de comprimento longitudinal do provete entre a aplicação dos valores máximo e mínimo da

tensão, calcularam-se as respectivas extensões longitudinais do provete (equações 4.2 e 4.3), e determinou-se o módulo de elasticidade, recorrendo à equação 4.4.

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta_a}{L_0} \quad 4.2$$

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta_b}{L_0} \quad 4.3$$

$$E = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad 4.4$$

Nas expressões anteriores, L_0 é o comprimento de referência nos alongâmetros, σ_a , ε_a e Δ_a , representam na situação de aplicação da carga máxima, respectivamente, a tensão aplicada, a extensão axial e a variação média de comprimento média nos dois alongâmetros; σ_b , ε_b e Δ_b são as respectivas contrapartidas na situação de aplicação do valor mínimo da força.

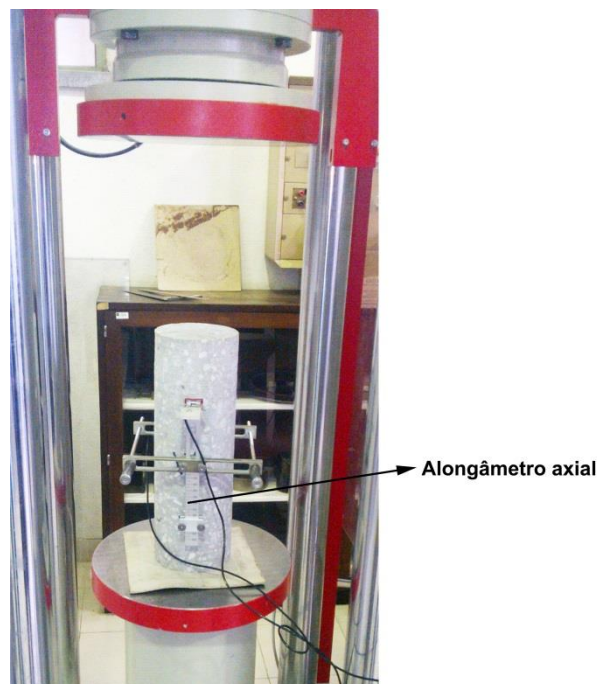


Figura 4.13 - Ensaio à compressão para determinação experimental do módulo de elasticidade dos provetes

Na Tabela 4.5 apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão das carotes cilíndricas. A precisão das leituras foi a seguinte: $\pm 0,1$ mm na medição do comprimento inicial, $\pm 0,01$ mm na medição da variação de comprimento nos alongâmetros, e $\pm 0,01$ MPa na medição da tensão aplicada.

Tabela 4.5 - Módulo de elasticidade experimental em ensaio de compressão

| Provete | Tensão Mínima (MPa) | Tensão Máxima (MPa) | Δ_b mm | Δ_a mm | L_o mm | E exp (GPa) |
|---------|---------------------|---------------------|---------------|---------------|----------|-------------|
| V1 | 1 | 7,08 | 0,59 | 0,62 | 183,5 | 37,19 |
| V2 | 1 | 6,30 | - | - | 183,5 | 21,10 |
| V3 | 1 | 7,08 | 0,405 | 0,443 | 183,5 | 29,36 |
| V4 | 1 | 7,08 | 0,398 | 0,436 | 183,5 | 29,36 |

4.5.2 Determinação do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade dinâmico através de ensaios de ultrassons

Para a determinação do coeficiente de Poisson dinâmico dos provetes utilizaram-se as relações existentes entre as velocidades de propagação das ondas P e S e o módulo de compressibilidade e o módulo de distorção. Sabendo também que o coeficiente de Poisson se relaciona com os módulos de compressibilidade confinado (M) e com o módulo de distorção (G), é possível obter uma expressão do coeficiente de Poisson em função das velocidades de propagação das ondas longitudinais e das ondas transversais [31].

$$M = \rho c_L^2 \quad 4.5$$

$$G = \rho c_T^2 \quad 4.6$$

$$v_d = \frac{M - 2G}{2M - 2G} \quad 4.7$$

Substituindo as equações 4.5 e 4.6 na equação 4.7 obtém-se a expressão utilizada na determinação experimental do coeficiente de Poisson:

$$v_d = \frac{c_L^2 - 2c_T^2}{2(c_L^2 - c_T^2)} \quad 4.8$$

Neste ensaio, as velocidades de propagação das ondas S e das ondas P foram determinadas utilizando transdutores de ondas S com frequência de 800 kHz. Os valores de velocidade foram determinados recorrendo a um osciloscópio para identificar a chegada da onda P e a posterior chegada das ondas S, como ilustrado na Figura 4.14. Nestes ensaios foram utilizadas as carotes extraídas dos provetes de betão. Para obter melhor definição do sinal no osciloscópio as carotes foram cortadas com a altura de cerca de 175 mm.

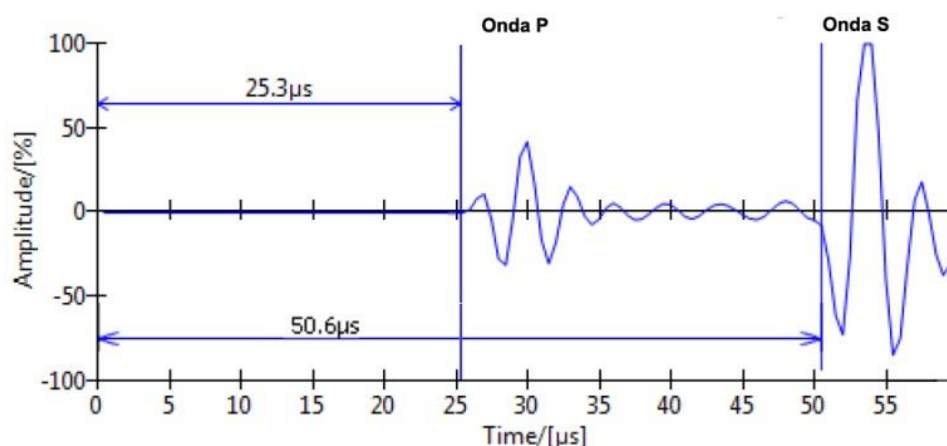


Figura 4.14 - Representação do sinal típico da chegada das ondas P e das ondas S na determinação experimental do coeficiente de Poisson (adaptado de [31])

Na tabela seguinte apresentam-se os resultados obtidos. Os valores do coeficiente de Poisson obtidos encontram-se dentro da gama habitual de variação de valores no betão. No entanto, considera-se que o valor determinado para o betão do provete V1 é baixo, e o valor determinado para o provete V2 é alto, o que se pode ficar a dever a algumas dificuldades na determinação e interpretação do tempo de propagação das ondas. Verifica-se que as velocidades de propagação das ondas P estão de acordo com as velocidades determinadas no subcapítulo 4.4.2, confirmando que os provetes V4 e V1 apresentam os resultados mais altos de velocidade de propagação.

Tabela 4.6 - Valores experimentais do coeficiente de Poisson determinado através de ensaios de propagação de ondas S e P

| Caracterização por Ultrassons | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|-----------|-------------------------|-----------|-------------------------|----------------|
| Proвете | Distância (mm) | T (μs) | V _P (m/s) | T (μs) | V _S (m/s) | v _d |
| V1 | 175,68 | 40,5 | 4338 | 63,5 | 2767 | 0,157 |
| V2 | 372,00 | 98,5 | 3777 | 172,5 | 2157 | 0,258 |
| V3 | 175,71 | 41,5 | 4234 | 68,5 | 2565 | 0,210 |
| V4 | 175,72 | 40 | 4393 | 66 | 2662 | 0,210 |



Figura 4.15 - Ensaio de determinação do coeficiente de Poisson através de ondas P e S

Como já foi referido, é possível relacionar a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas com o módulo de elasticidade dinâmico, coeficiente de Poisson e massa volúmica do material. A partir dos valores médios da velocidade de propagação das ondas apresentados na Tabela 4.4 e dos valores do coeficiente de Poisson determinados experimentalmente pelos ensaios de propagação das ondas S (Tabela 4.6) foram calculados os valores do módulo de elasticidade dinâmico para cada um dos provetes recorrendo à equação 4.1. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Valores do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes

| Provetes | Velocidade média de propagação (m/s) | v_d | Massa volúmica (kg/m^3) | E_d (GPa) |
|----------|--------------------------------------|-------|------------------------------------|-------------|
| V1 | 4301 | 0,157 | 2215 | 38,6 |
| V2 | 3661 | 0,258 | 1919 | 21,1 |
| V3 | 4096 | 0,210 | 2333 | 34,8 |
| V4 | 4369 | 0,210 | 2333 | 39,6 |

4.5.3 Comparação do módulo de elasticidade obtido com os diversos ensaios

Na Tabela 4.8 apresentam-se os valores do módulo de elasticidade dinâmico e do módulo de elasticidade determinado nos ensaios de compressão. Verifica-se que nos provetes V1 e V2 se obtêm valores muito próximos ou mesmo iguais. Nos provetes V3 e V4 os valores de módulo de elasticidade dinâmico são cerca de 1,3 a 1,4 vezes superiores aos valores obtidos recorrendo aos ensaios de compressão.

A diferença entre os valores medidos do módulo dinâmico e o módulo estático foi atribuída, no passado, a efeitos viscoelásticos, responsáveis pelo excesso no valor obtido por ensaio dinâmico. Recentemente, com a melhoria tecnológica dos equipamentos e dos métodos de ensaio, a determinação do módulo em ensaios estáticos veio confirmar que aquela diferença se devia quase exclusivamente à insuficiente precisão dos métodos de ensaio lento. De facto,

sabe-se hoje que, sem descartar a influência dos efeitos viscoelásticos, a rigidez dos geomateriais (nos quais se inclui o betão) depende essencialmente do nível de deformação a que estão sujeitos [32]. Assim, se em ensaios lentos ou dinâmicos forem induzidos níveis semelhantes de deformação as diferenças observadas nos módulos medidos serão atribuíveis aos efeitos de viscoelasticidade e assumirão, em situações correntes, valores marginais. Deste modo, as diferenças de 21% a 38% observadas na Tabela 4.8 são atribuíveis à imposição de diferentes níveis de deformação no momento da medição, concretamente ao facto de o nível de deformação nos ensaios estáticos ser bastante superior ao associado à propagação das ondas.

Tabela 4.8 - Comparação entre os valores experimentais do módulo de elasticidade e do módulo de elasticidade dinâmico dos provetes

| Provetes | E_d (GPa) | E compressão (GPa) |
|----------|----------------|--------------------------|
| V1 | 39 | 37 |
| V2 | 21 | 21 |
| V3 | 35 | 29 |
| V4 | 40 | 29 |

4.6 Avaliação da profundidade de fendas através de ensaios de propagação indiretos

Para o cálculo da estimativa de profundidade das fendas nos diversos provetes foram utilizados os métodos descritos no subcapítulo 3.6 com exceção do método sugerido pela Norma Inglesa BS [29] dado a dimensão dos provetes ser inferior à dimensão mínima requerida (tendo em conta o diâmetro dos transdutores). Para o Nos provetes V3, V4, V3.1 e V4.1 foi possível aplicar os restantes métodos descritos. Nos provetes V1 e V2 foram encontradas dificuldades na aplicação dos ensaios de cálculo de profundidade de fendas devido ao facto de as fendas não estarem centradas na face do provete e de haver mais do que uma fenda nessa face, tendo por isso apenas sido aplicados os Métodos T e L.

Os transdutores foram colocados nas posições recomendadas nos métodos descritos no subcapítulo 3.6.

Para determinar a profundidade das fendas mais próximas da extremidade do provete recorrendo ao Método T e ao Método L, foram adotados dois modos de disposição dos transdutores, ilustrados na Figura 4.16.

- i) **O modo A**, em que o transdutor-emissor se encontrava “fixo” na extremidade do provete mais afastado da fenda (no caso dos provetes V1 e V2 o transdutor-emissor foi colocado

o mais longe possível da fenda, tendo o cuidado de garantir que entre o emissor-transmissor e o emissor-recetor não existisse mais do que uma fenda).

- ii) O **modo B**, em que o transdutor-emissor se encontrava “fixo” na extremidade do provete mais próxima da fenda.

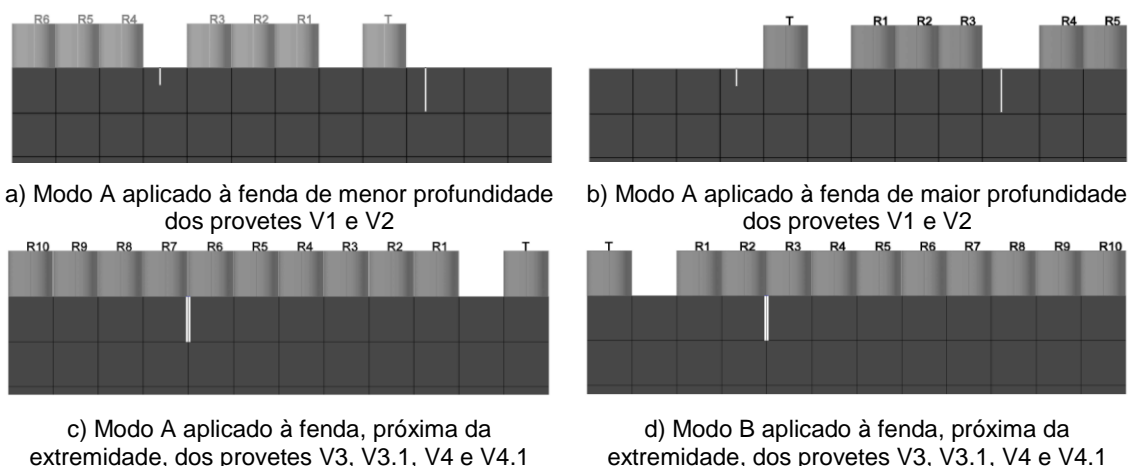


Figura 4.16 - Disposição dos transdutores pelo modo A e modo B aplicados às fendas próximas da extremidade dos provetes

Para os provetes V1 e V2, devido à disposição das fendas, apenas foi possível aplicar o **modo A**. Para aplicar o método de afastamento sucessivo linear (Pinto, Medeiros e Padaratz), foram utilizados os valores do **modo B**, pois os valores do modo A não tinham leituras suficientes depois da fenda.

Para o método de Bungey e para o modelo de afastamento sucessivo equidistante, aplicados às fendas centrais da face inferior dos provetes V3, V3.1, V4 e V4.1, os transdutores foram colocados nas quadrículas adjacentes à fenda, um de cada lado da fenda. Após esta medição o transdutor-emissor e o transdutor-recetor foram deslocados para a quadrícula seguinte afastando-se igualmente um do outro e da fenda (ver Figura 4.17), e assim sucessivamente para as restantes leituras. Foram registadas seis leituras.

O cálculo da estimativa da profundidade de fendas baseou-se em leituras indiretas. Nestes casos, em cada face do provete foram considerados quatro alinhamentos (ver Figura 4.18), aumentando assim o número de medições efetuadas.

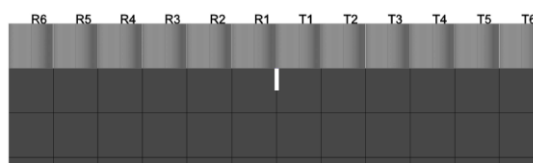


Figura 4.17 - Disposição dos transdutores para aplicação do método de Bungey e do modelo de afastamento sucessivo equidistante aplicado às fendas centrais dos provetes V3, V3.1, V4 e V4.1

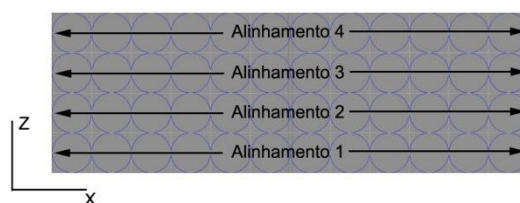


Figura 4.18 - Alinhamentos de leituras indiretas

4.6.1 Estimativa da profundidade de fendas

Devido ao facto das fendas dos provetes V1 e V2 se encontrarem na mesma face do provete, e não estarem centradas, não foi possível aplicar o método de Bungey (ver subcapítulo 3.6.2), nem os métodos sugeridos por Pinto, Medeiros e Padaratz (MPMP) (ver subcapítulo 3.6.5). Na Tabela 4.9 resumem-se os métodos aplicados a cada provete.

Para cada fenda foram realizadas 4 estimativas de profundidade, correspondentes aos 4 alinhamentos referidos (ver Figura 4.18) e os valores calculados foram comparados com a profundidade da fenda. Os erros relativos obtidos, desvios relativamente à verdadeira medida, foram classificados por um padrão de cores indicado na Tabela 4.10.

Tabela 4.9 - Resumo dos métodos aplicados a cada provete

| | Fendas centrais | | Fendas próximas da extremidade | | |
|------|------------------|----------------------------|--------------------------------|----------|----------|
| | Método de Bungey | Método Equidistante (MPMP) | Método Linear (MPMP) | Método T | Método L |
| V1 | | | | • | • |
| V2 | | | | • | • |
| V3 | • | • | • | • | • |
| V4 | • | • | • | • | • |
| V3.1 | • | • | • | • | • |
| V4.1 | • | • | • | • | • |

Tabela 4.10 - Intervalo de cores para os valores do módulo do erro

| Intervalos de cores para valores do erro (%) |
|--|
| 0 - 15 |
| 15 - 30 |
| 30 - 50 |
| > 50 |

4.6.1.1 Apresentação dos resultados obtidos com o método de Bungey

Para cada alinhamento foram efetuadas seis medições em posições equidistantes do tempo de propagação indireto (ver subcapítulo 3.6.2 a Figura 4.17 e a Figura 4.18). Registaram-se os tempos de propagação, T_C , para cada alinhamento. O valor de T_{SF} foi medido numa zona de referência do provete sem o efeito da fenda. Com a distância medida do transdutor ao centro da fenda (X) foi aplicada a equação 3.9 estimando-se assim a profundidade da fenda (h). Das seis medições registadas apenas são apresentadas na Tabela 4.11 as médias dos valores de h que se encontravam dentro do intervalo $h < X < 4h$, intervalo no qual, segundo Medeiros [4], o método de Bungey, apresenta valores com precisão da ordem dos 15%. Os resultados das estimativas de profundidade de fendas obtidos pelo método de Bungey e os erros percentuais associados encontram-se, por sua vez na Tabela 4.12.

Tabela 4.11 - Valores dos intervalos para assegurar a melhor precisão do método de Bungey na estimativa de profundidade de fendas

| Intervalos de Bungey (cm) | | | | |
|---------------------------|------------|------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Profundidade da fenda | X mínimo | X máximo | Distância mínima entre transdutores | Distância máxima entre transdutores |
| 2 | 2 | 8 | 4 | 16 |
| 2.5 | 2.5 | 10 | 5 | 20 |
| 5 | 5 | 20 | 10 | 40 |
| 7 | 7 | 28 | 14 | 56 |

Tabela 4.12 - Resultados das estimativas da profundidade de fendas calculadas pelo método de Bungey

| | Estimativa de h pelo método de Bungey (cm) | | | | h (cm) | Erro (%) | | | |
|---------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Alinh. 1 | Alinh. 2 | Alinh. 3 | Alinh. 4 | | Alinh. 1 | Alinh. 2 | Alinh. 3 | Alinh. 4 |
| V1 (24 kHz) | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| V2 (24 kHz) | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| V3 (24 kHz) | 3,9 | 3,3 | 3,4 | 4,3 | 2,5 | 58 | 30 | 36 | 73 |
| V4 (24 kHz) | 4,7 | 3,9 | 4,5 | 4,7 | 5 | -5 | -21 | -10 | -7 |
| V3.1 (24 kHz) | 3,9 | 3,3 | 3,4 | 4,3 | 2,5 | 58 | 30 | 36 | 73 |
| V3.1 (54 kHz) | 3,7 | 2,6 | 3,5 | 4,0 | 2,5 | 48 | 4 | 39 | 59 |
| V4.1 (24 kHz) | 7,6 | 6,4 | 7,2 | 8,0 | 7 | 9 | -9 | 3 | 14 |
| V4.1 (54 kHz) | 7,6 | 5,7 | 6,4 | 8,0 | 7 | 9 | -19 | -9 | 14 |

A análise da Tabela 4.12 permite verificar que o método se revela pouco preciso para estimar a profundidade das fendas de 2,5 cm. Para as fendas de 5 cm e de 7 cm obtiveram-se quase exclusivamente valores quase exclusivamente com erros inferiores a 15%. Comparando a influência da frequência dos transdutores no cálculo da profundidade das fendas verifica-se que, para a fenda de 2,5 cm no provete V3.1 os transdutores de 54 kHz apresentam resultados

ligeiramente mais próximos dos valores reais. Para a fenda de 7 cm no provete 4.1 verifica-se que com os transdutores de 24 kHz se obtêm melhores resultados, no entanto esta diferença é pouco significativa e poderá ter sido causada por pequenos erros experimentais. Constatase que os alinhamentos 1 e 4 não garantem a desejada qualidade de estimativa, o que seria de antever face à influência perturbadora das fronteiras verticais adjacentes, demasiadamente próximas de acordo com o critério da dimensão mínima da norma BS 1881.

Na Figura 4.19 apresentam-se graficamente os valores estimados de profundidade de fendas obtidos com o método de Bungey. O traço a preto representa a profundidade real da fenda. É possível confirmar o observado na Tabela 4.12: este método apresenta boas estimativas de profundidade de fendas para as fendas com profundidade superior ou igual a 5 cm.

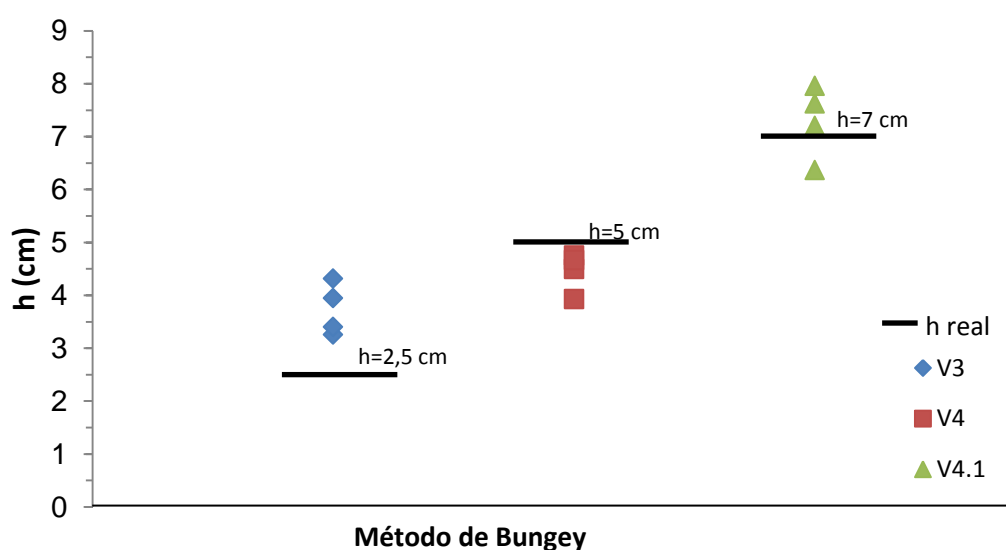


Figura 4.19 - Estimativas da profundidade das fendas obtidas com o método de Bungey

4.6.1.2 Apresentação dos resultados obtidos com o Método T e com o Método L

O Método T e o Método L foram utilizados para determinar a profundidade de fendas de todos os provetes. Para cada fenda foram realizadas quatro estimativas de profundidade, uma por cada alinhamento definido pela malha do provete. Adicionalmente, para cada alinhamento, foram utilizados dois modos (A e B, descritos na Figura 4.16) com uma disposição diferente dos transdutores.

Apresentam-se de seguida as estimativas da profundidade de fendas. Como exemplo, são apresentados os cálculos para a estimativa da fenda de 2,5 cm no provete V4 a estimativa da fenda de 2,5 cm no provete V4, alinhamento 2, colocando os transdutores segundo os modos A

e B (Tabela 4.13 e Figura 4.20). Neste caso a fenda encontra-se a uma distância de 40 cm da extremidade do provete onde se encontra o emissor, $L=40$ cm. Na Tabela 4.13 estão representados os tempos de propagação experimentais. Os tempos de propagação sem a fenda entre o emissor e o recetor, do R1 ao R6, estão representados a azul, e a encarnado estão representados os tempos de propagação com a fenda situada entre o emissor e o recetor, isto é, do R7 ao R10.

Tabela 4.13 - Valores dos tempos de propagação no provete V4, Método T - modo A

| Distância entre emissor e recetor (cm) | Modo A, Provete V4 (fenda 2,5 cm) | |
|--|--------------------------------------|---------------------------------|
| | Número do recetor | Tempos de propagação (μ s) |
| 10 | R1 | 21,6 |
| 15 | R2 | 35,3 |
| 20 | R3 | 46,8 |
| 25 | R4 | 59,5 |
| 30 | R5 | 70,9 |
| 35 | R6 | 81,6 |
| 40 | R7 | 99,5 |
| 45 | R8 | 109,4 |
| 50 | R9 | 119,5 |
| 55 | R10 | 133,5 |

Na Figura 4.20 estão representados graficamente os valores da Tabela 4.13, e as equações das retas correspondentes às regressões lineares dos tempos de propagação, antes da fenda, $T_a(x)$, e depois da fenda, $T_d(x)$ (ver subcapítulo 3.6.3). Para estimar a profundidade da fenda recorrendo ao **Método T** calculou-se o valor de T usando a equação 3.17, e substituiu-se este valor na equação 3.16, obtendo-se a estimativa final de h:

$$T = T_d(40) - T_a(40) = 4,824 \mu s$$

$$h = \frac{\frac{4,824}{2,3459} \left(\frac{4,824}{2,3459} + 80 \right)}{2 \left(\frac{4,824}{2,3459} + 40 \right)} = 2,0 \text{ cm}$$

Na aplicação do Método L, a reta que melhor aproxima os valores depois da fenda, usando o declive da reta ajustada para os valores antes da fenda, tem a seguinte expressão:

$$T_d(x) = 2,3459x + 4,045$$

Calculando os valores de T_1 e T_2 , e aplicando a equação 3.19 obtém-se a estimativa de h calculada com o Método L:

$$T_1 = T_a(40) = 93,836 \mu s; T_2 = T_d(40) = 97,881 \mu s$$

$$h = \frac{L}{2} \left(\frac{T_2}{T_1} - \frac{T_1}{T_2} \right) = 1,7 \text{ cm}$$

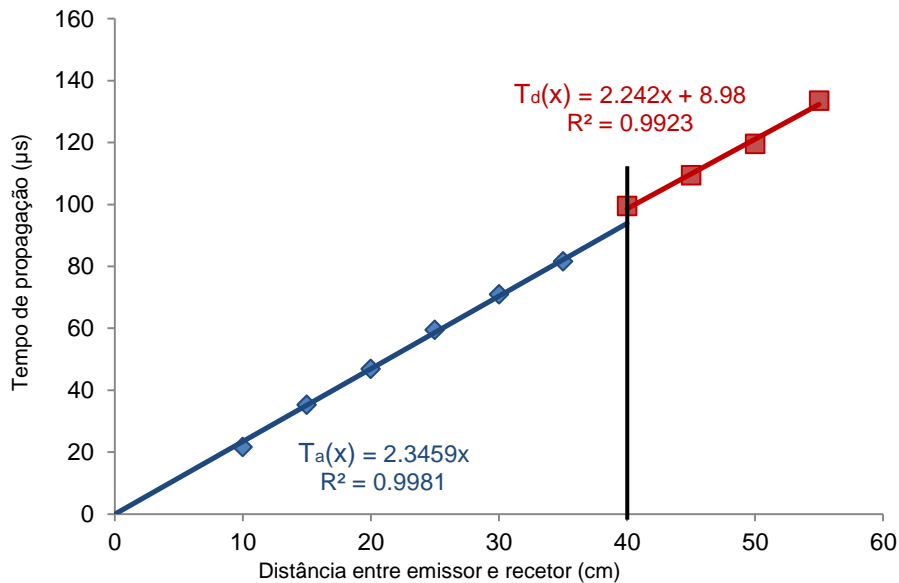


Figura 4.20 - Representação gráfica do Método T para o alinhamento 2 do provete V4, modo A, (fenda de 2,5 cm de profundidade)

Na Tabela 4.14 e na Tabela 4.15 apresentam-se os resultados das estimativas de cálculo de fendas para os modos A e B e para os quatro alinhamentos mencionados. Da análise dos valores apresentados nestas tabelas, verifica-se que as estimativas do **Método T** no provete V1 são enviesadas por excesso, com erros superiores a 30 %, no caso da fenda de 2 cm, e por defeito, com erros entre 23 e 54% no caso da fenda de 5 cm. Esta precisão grosseira poderá dever-se ao facto de o número de leituras indiretas realizadas neste provete ter sido menor (apenas 5) que nos restantes (7 leituras no provete V2 e 10 leituras nos provetes V3 e V4). O número de leituras dos provetes V1 e V2 foi condicionado pela disposição das fendas, que se encontravam dispostas na mesma face dos provetes.

Da análise da Tabela 5.15 conclui-se que o método conduz a resultados menos precisos para as fendas de 2 e 2,5 cm. No entanto, no caso do provete V4.1 verifica-se que para a fenda de 2,5 cm, com os transdutores de 24 kHz de frequência, foi possível obter estimativas da profundidade da fenda em dois ou três alinhamentos, dependendo do modo de disposição dos transdutores com erro inferior a 20 %. O modo A de disposição dos transdutores conduz a estimativas com erros aceitáveis. Verifica-se que o modo B de disposição dos transdutores conduz a estimativas mais próximas do valor real, revelando, assim, a importância de um maior número de leituras experimentais após a fenda. No entanto, alguns valores obtidos com este

modo de disposição dos transdutores apresentam diferenças em relação à profundidade de fenda superiores a 30%.

Tabela 4.14 – Comparação de profundidade real das fendas com os valores estimados recorrendo ao Método T (modos A e B)

| Provetes | Estimativa da profundidade pelo Método T (cm) | | | | | | | | Profundidade (cm) |
|---------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------------|
| | Modo A | | | | Modo B | | | | |
| | Alinh. 1 | Alinh. 2 | Alinh. 3 | Alinh. 4 | Alinh. 1 | Alinh. 2 | Alinh. 3 | Alinh. 4 | |
| V1 (24 kHz) | 4,6 | 5,7 | 4,6 | 2,6 | - | - | - | - | 2 |
| V1 (24 kHz) | 3,5 | 3,5 | 2,3 | 3,8 | - | - | - | - | 5 |
| V2 (24 kHz) | 5,1 | 7,5 | 7,5 | 7,4 | - | - | - | - | 7 |
| V3 (24 kHz) | 4,5 | 3,8 | 3,9 | 3,9 | 5,2 | 4,4 | 3,3 | 4,5 | 5 |
| V4 (24 kHz) | 2,2 | 2,0 | 1,9 | 2,1 | 2,6 | 1,4 | 2,1 | 1,9 | 2,5 |
| V3.1 (24 kHz) | 6,3 | 5,9 | 6,0 | 6,7 | 8,1 | 6,0 | 6,3 | 7,1 | 7 |
| V3.1 (54 kHz) | 6,2 | 5,5 | 6,1 | 7,3 | 10,3 | 7,2 | 6,1 | 7,1 | 7 |
| V4.1 (24 kHz) | 2,2 | 2,0 | 1,9 | 2,1 | 2,6 | 1,4 | 2,1 | 1,9 | 2,5 |
| V4.1 (54 kHz) | 1,0 | 1,2 | 2,6 | 2,0 | 2,7 | 2,5 | 0,7 | 0,7 | 2,5 |

Tabela 4.15 - Valores do erro percentual da estimativa da profundidade de fendas recorrendo ao Método T e usando os modos A e B em cada alinhamento

| Provetes | Erro Método T (%) | | | | | | | | Profundidade (cm) |
|---------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------------|
| | Modo A | | | | Modo B | | | | |
| | Alinh. 1 | Alinh. 2 | Alinh. 3 | Alinh. 4 | Alinh. 1 | Alinh. 2 | Alinh. 3 | Alinh. 4 | |
| V1 (2 cm) | 131 | 184 | 128 | 31 | - | - | - | - | 2 |
| V1 (5 cm) | -30 | -30 | -54 | -23 | - | - | - | - | 5 |
| V2 | -27 | 7 | 7 | 5 | - | - | - | - | 7 |
| V3 | -10 | -24 | -22 | -22 | 3 | -11 | -34 | -10 | 5 |
| V4 | -13 | -20 | -24 | -16 | 3 | -45 | -18 | -25 | 2,5 |
| V3.1 (24 kHz) | -10 | -16 | -14 | -5 | 15 | -14 | -10 | 1 | 7 |
| V3.1 (54 kHz) | -11 | -22 | -13 | 4 | 47 | 3 | -13 | 1 | 7 |
| V4.1 (24 kHz) | -13 | -20 | -24 | -16 | 3 | -45 | -17 | -25 | 2,5 |
| V4.1 (54 kHz) | -59 | -53 | 4 | -19 | 7 | 0 | -70 | -72 | 2,5 |

Na Figura 4.21 apresentam-se graficamente os valores estimados da profundidade de fendas obtidos com o Método T. Observa-se que as estimativas de profundidade de fendas estão dispersas em relação à profundidade real da fenda, existindo alguns valores coincidentes e outros que se afastam significativamente do seu valor real. Constata-se que para a fenda de 2,5 cm se conseguiram obter, com este método, boas estimativas, ao contrário do observado para a fenda de 2 cm.

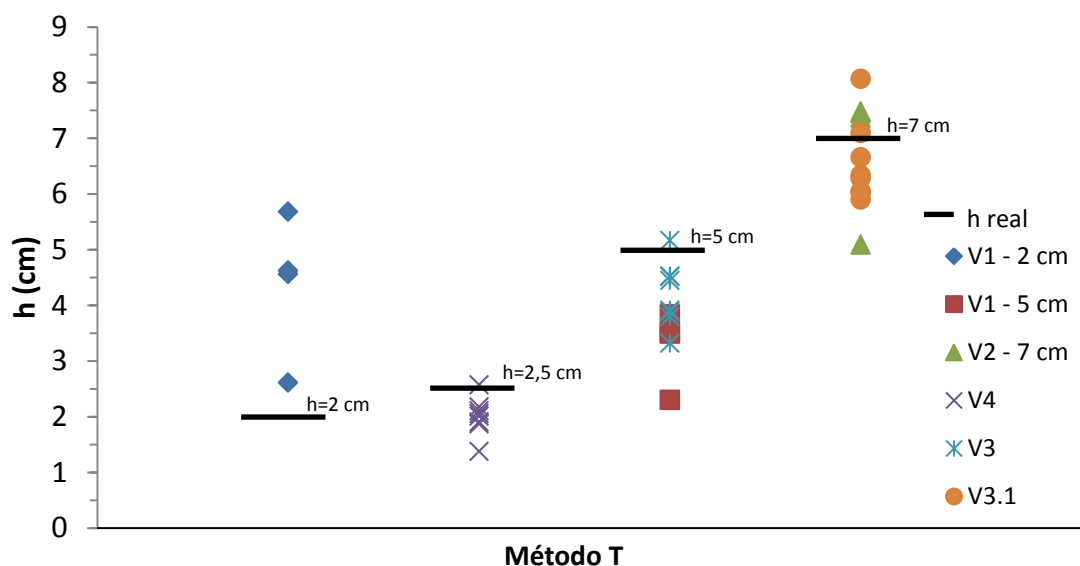


Figura 4.21 - Estimativas da profundidade das fendas obtidas com o Método T

Os resultados obtidos com o Método L são apresentados na Tabela 4.16 e na Tabela 4.17. Verifica-se que se obtêm, globalmente, erros superiores aos obtidos com o Método T, o que é justificado pelo facto de o Método L ser uma versão simplificada do Método T. Não foi possível determinar com precisão as estimativas da profundidade da fenda de 5 cm do provete V1. Observa-se que o modo B, à semelhança do que foi observado para o Método T, apresenta melhores resultados do que o modo A. No provete V3.1 não se verificaram alterações significativas com a alteração da frequência dos transdutores. No entanto, para o provete V4.1 os resultados obtidos com os transdutores de 54kHz são expressivamente piores do que os obtidos com os transdutores de 24 kHz. Admite-se que estes desvios possam ter resultado de erros experimentais, porque essa diferença expressiva não se verifica da mesma maneira para o provete V3.1.

Tabela 4.16 - Comparação da profundidade real das fendas com os valores estimados recorrendo ao Método L (modos A e B referidos no subcapítulo 4.6.1)

| Provetes | Estimativa da Profundidade pelo Método L (cm) | | | | | | | | Profundidade (cm) |
|--------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------------|
| | Modo A | | | | Modo B | | | | |
| | Alinh. 1 | Alinh. 2 | Alinh. 3 | Alinh. 4 | Alinh. 1 | Alinh. 2 | Alinh. 3 | Alinh. 4 | |
| V1 (2 cm) (24 kHz) | 2,1 | 1,5 | 2,6 | 1,2 | - | - | - | - | 2 |
| V1 (5 cm) (24 kHz) | 2,3 | 1,5 | 1,0 | 2,3 | - | - | - | - | 5 |
| V2 (24 kHz) | 6,0 | 4,5 | 4,5 | 8,3 | - | - | - | - | 7 |
| V3 (24 kHz) | 3,4 | 2,8 | 2,7 | 3,2 | 6,3 | 4,4 | 3,3 | 5,3 | 5 |
| V4 (24 kHz) | 1,7 | 1,7 | 1,5 | 2,6 | 4,0 | 2,0 | 2,7 | 2,2 | 2,5 |
| V3.1 (24 kHz) | 4,6 | 3,9 | 4,2 | 4,8 | 8,9 | 6,5 | 6,7 | 7,6 | 7 |
| V3.1 (54 kHz) | 4,4 | 4,0 | 4,1 | 5,5 | 11,6 | 6,5 | 6,3 | 7,9 | 7 |
| V4.1 (24 kHz) | 1,7 | 1,7 | 1,5 | 2,6 | 4,0 | 2,0 | 2,7 | 2,2 | 2,5 |
| V4.1 (54 kHz) | 1,6 | 2,2 | 2,5 | 1,5 | 4,2 | 4,6 | 2,4 | 4,6 | 2,5 |

Tabela 4.17 - Valores do erro percentual da estimativa da profundidade de fendas recorrendo ao Método L usando os modelos A e B em cada alinhamento

| Provetes | Erro Método L (%) | | | | | | | | Profundidade Real (cm) |
|---------------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------------|
| | Modelo A | | | | Modelo B | | | | |
| | Alinh. 1 | Alinh. 2 | Alinh. 3 | Alinh. 4 | Alinh. 1 | Alinh. 2 | Alinh. 3 | Alinh. 4 | |
| V1 (2 cm) | 3 | -24 | 32 | -41 | - | - | - | - | 2 |
| V1 (5 cm) | -55 | -70 | -79 | -55 | - | - | - | - | 5 |
| V2 | -14 | -36 | -36 | 18 | - | - | - | - | 7 |
| V3 | -33 | -43 | -46 | -36 | 25 | -12 | -35 | 6 | 5 |
| V4 | -33 | -33 | -42 | 2,0 | 61 | -20 | 9 | -11 | 2,5 |
| V3.1 (24 kHz) | -34 | -45 | -41 | -32 | 27 | -7 | -5 | 8 | 7 |
| V3.1 (54 kHz) | -38 | -43 | -42 | -21 | 65 | -7 | -10 | 13 | 7 |
| V4.1 (24 kHz) | -33 | -33 | -42 | 2,0 | 61 | -20 | 9 | -11 | 2,5 |
| V4.1 (54 kHz) | -35 | -14 | 0 | -39 | 68 | 84 | -2 | 82 | 2,5 |

Na Figura 4.22 representam-se graficamente os valores estimados da profundidade de fendas obtidas com o Método L. Verifica-se que num mesmo provete se obtêm, em diferentes alinhamentos e diferentes modelos, estimativas quer muito próximas quer muito afastadas do valor real da profundidade de fendas. Obtém-se, à semelhança do observado no Método T, boa precisão na determinação de fendas de pequena profundidade, caso das fendas de 2 cm e de 2,5 cm.

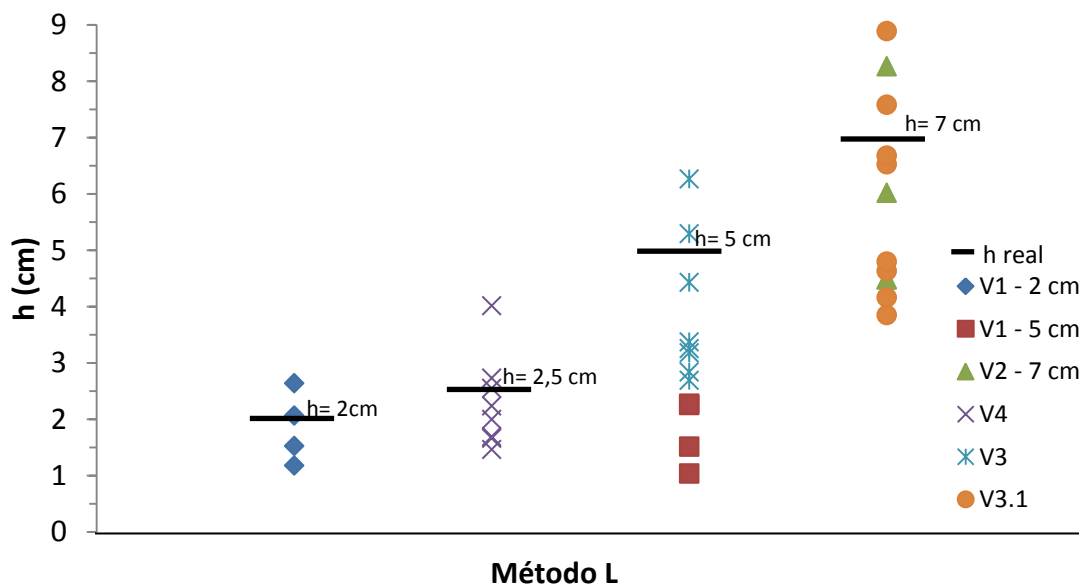


Figura 4.22 - Estimativas da profundidade das fendas obtidas com o Método L

4.6.1.3 Apresentação dos resultados obtidos com o método de Pinto, Medeiros e Padaratz (MPMP)

Numa primeira fase, para o caso das fendas centrais, o método foi aplicado considerando todas as leituras de tempos de propagação indireta para a elaboração do gráfico. No entanto, verificou-se que a utilização das 6 leituras, na elaboração do gráfico para o método de afastamento sucessivo equidistante, conduziu a erros entre 25 e 70 %. De modo a tentar obter melhores resultados com este método, sabendo que, de acordo com o seu autor [22], os resultados deveriam ter um erro inferior a 15 %, utilizaram-se apenas leituras de tempos de propagação indireta que respeitassem o intervalo definido por Medeiros [4] para melhorar a precisão do método de Bungey (ver Tabela 4.11). Para a análise das fendas de 2,5 cm, o intervalo de transdutores (Tabela 4.11) limitava o ensaio em apenas uma forma de disposição de transdutores, inviabilizando a estimativa da profundidade da fenda. No entanto, para estes casos o intervalo de valores aplicado será igual ao aplicado para a fenda de 5 cm. Como exemplo apresentam-se dois cálculos que permitiram a estimativa da profundidade da fenda de 2,5 cm, próxima da extremidade no provete V4, para o modelo de afastamento sucessivo linear, e para a fenda de 5 cm situada no centro do provete V4, para o modelo de afastamento sucessivo equidistante (Tabela 4.18, Figura 4.23, Tabela 4.19 e Figura 4.24). Os cálculos apresentados foram feitos com as leituras do alinhamento 2.

Tabela 4.18 - Tempos de propagação registados e valores utilizados na elaboração do gráfico correspondente ao método de afastamento sucessivo linear (MPMP)

| Distância entre emissor e recetor (cm) | Tempo (μs) | X_i^2 (cm ²) | $(T_i - \frac{T_1}{2})^2$ (μs ²) |
|--|------------|----------------------------|--|
| 35 | 82,6 | 306,25 | 6822,76 |
| 40 | 95,6 | 756,25 | 9139,36 |
| 45 | 106,8 | 1056,25 | 11406,24 |
| 50 | 119,5 | 1406,25 | 14280,25 |
| 55 | 131,3 | 1806,25 | 17239,69 |

Na Figura 4.23 está representado o gráfico correspondente à aplicação do método de afastamento sucessivo linear. A estimativa da profundidade de fenda é a raiz quadrada do simétrico da ordenada na origem da reta que melhor aproxima os pontos X_i^2 e $(T_i - \frac{T_1}{2})^2$. Observa-se neste caso que a ordenada na origem da regressão linear é positiva. Neste caso não se pode obter uma estimativa da profundidade da fenda pois o modelo matemático do método não é aplicável para estes casos. Esta incongruência poderá dever-se a erros de medição dos tempos de propagação.

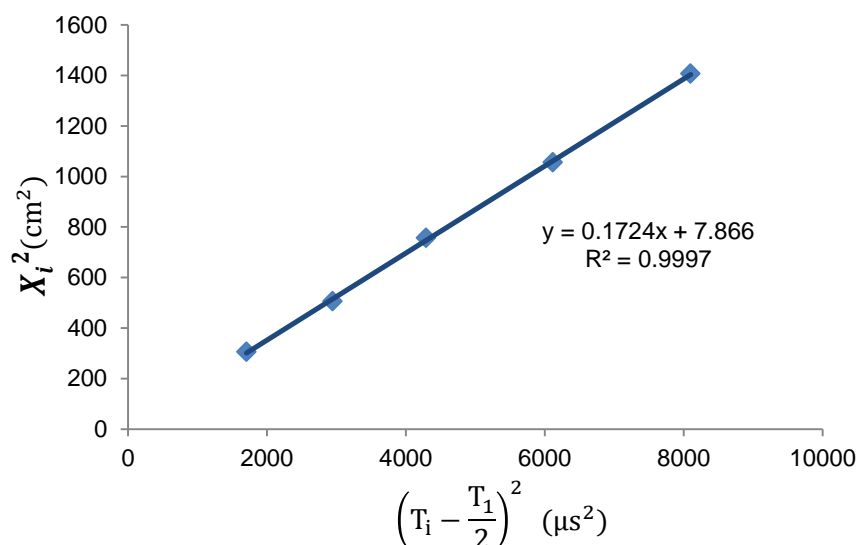


Figura 4.23 - Representação gráfica do método de afastamento sucessivo linear (MPMP) para o alinhamento 2 do provete V4 (fenda com 2,5 cm de profundidade)

Na Figura 4.24 está representado o gráfico correspondente ao método de afastamento sucessivo equidistante. A estimativa da profundidade de fenda é calculada da mesma forma que no método anterior. Considerando todos os intervalos de distâncias entre transdutor-emissor e transdutor-recetor representado pelos pontos a azul na Figura 4.24, obtém-se a seguinte estimativa de profundidade de fenda:

$$h^2 = 49,944 \Rightarrow h = 7,1 \text{ cm}$$

Considerando agora a proposta de Medeiros [4] para melhorar a precisão do método de Bungey [7], representa-se na Figura 4.24 as distâncias entre transdutor-emissor e transdutor-recetor (pontos representados a encarnado) para os quais se obtém a seguinte estimativa de profundidade de fenda:

$$h^2 = 20,124 \Rightarrow h = 4,5 \text{ cm}$$

Tabela 4.19 - Tempos de propagação registados e valores utilizados na elaboração do gráfico correspondente ao método de afastamento sucessivo equidistante (MPMP)

| Distância entre emissor e recetor (cm) | Tempo (μs) | $X_i^2 (cm^2)$ | $\frac{T_i^2}{4} (\mu s^2)$ |
|--|-------------------|----------------|-----------------------------|
| 5 | 51,5 | 6,25 | 663,06 |
| 15 | 39,7 | 56,25 | 394,02 |
| 25 | 59,2 | 156,25 | 876,16 |
| 35 | 81,3 | 306,25 | 1652,42 |
| 45 | 103,7 | 506,25 | 2688,42 |
| 55 | 127,5 | 756,25 | 4064,06 |

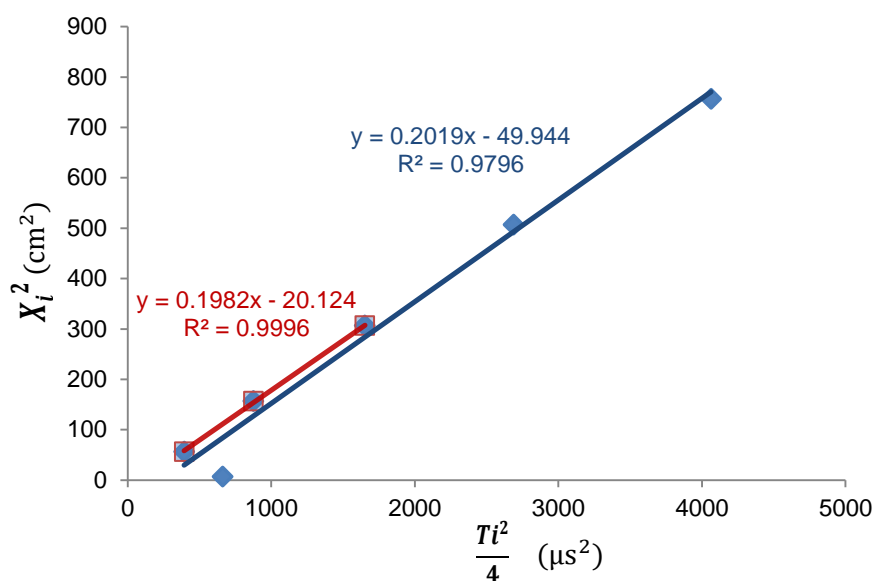


Figura 4.24 - Representação gráfica do Método de afastamento sucessivo equidistante (MPMP) para o alinhamento 2 do provete V4 (fenda de 5 cm de profundidade)

Na Tabela 4.20 e na Tabela 4.21 apresentam-se todos os resultados obtidos aplicando os métodos de afastamento sucessivo equidistante e o método de afastamento sucessivo linear. Na Figura 4.25 e na Figura 4.26 apresenta-se o resumo da estimativa da profundidade das fendas obtidas com os mesmos métodos.

Tabela 4.20 - Estimativa da profundidade das fendas localizadas no centro do provete, usando o método de afastamento sucessivo equidistante (MPMP), e valor do erro percentual

| Provetes | Estimativa da Profundidade pelo método Pinto, Medeiros e Padaratz (cm) | | | | | | | | |
|---------------|--|----------|----------|----------|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | Fenda Central | | | | Profundidade Real (cm) | Erro (%) | | | |
| | Alinh. 1 | Alinh. 2 | Alinh. 3 | Alinh. 4 | | Alinh. 1 | Alinh. 2 | Alinh. 3 | Alinh. 4 |
| V1 (24 kHz) | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| V2 (24 kHz) | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| V3 (24 kHz) | - | 1,0 | 2,2 | - | 2,5 | - | -60 | -11 | - |
| V4 (24 kHz) | 4,5 | 4,5 | 4,6 | 4,6 | 5 | -10 | -10 | -9 | -7 |
| V3.1 (24 kHz) | - | 1,0 | 2,2 | - | 2,5 | - | -60 | -11 | - |
| V3.1 (54 kHz) | - | 2,3 | 3,0 | 2,1 | 2,5 | - | -8 | 20 | -16 |
| V4.1 (24 kHz) | 6,7 | 6,8 | 8,0 | 7,3 | 7 | -4 | -3 | 15 | 4 |
| V4.1 (54 kHz) | 6,5 | 7,3 | 7,1 | 7,2 | 7 | -7 | 4 | 2 | 2 |

Analisando a Tabela 4.20 verifica-se que o valor calculado da profundidade de fendas apresenta erros inferiores a 15%, na maioria dos casos. Excetua-se o valor obtido no alinhamento 2 para a fenda de 2,5 cm, que apresenta um erro de 60%. Os valores que não se apresentam (assinalados com "-") não são possíveis de calcular devido à regressão linear da reta apresentar

uma ordenada na origem positiva. No provete V3, os transdutores de 54 kHz, em vez dos de 24 kHz permitem obter a estimativa da profundidade da fenda em mais um dos alinhamentos. Esta melhoria dos resultados pode ser explicada pela melhor precisão dos transdutores de 54kHz para curtas distâncias de ensaio. Esta melhor precisão deve-se ao seu menor comprimento de onda. Na Figura 4.25 é visível que as estimativas para as fendas de 5 cm e de 7 cm estão próximas da sua profundidade real. O número de estimativas obtidas para a fenda de 2,5 cm não permite tirar conclusões sobre a aplicabilidade do método para este tipo de fendas. No entanto, observando as estimativas obtidas com os transdutores de 54 kHz (Tabela 4.20) pode-se concluir que este método pode ser utilizado para este tipo de fendas.

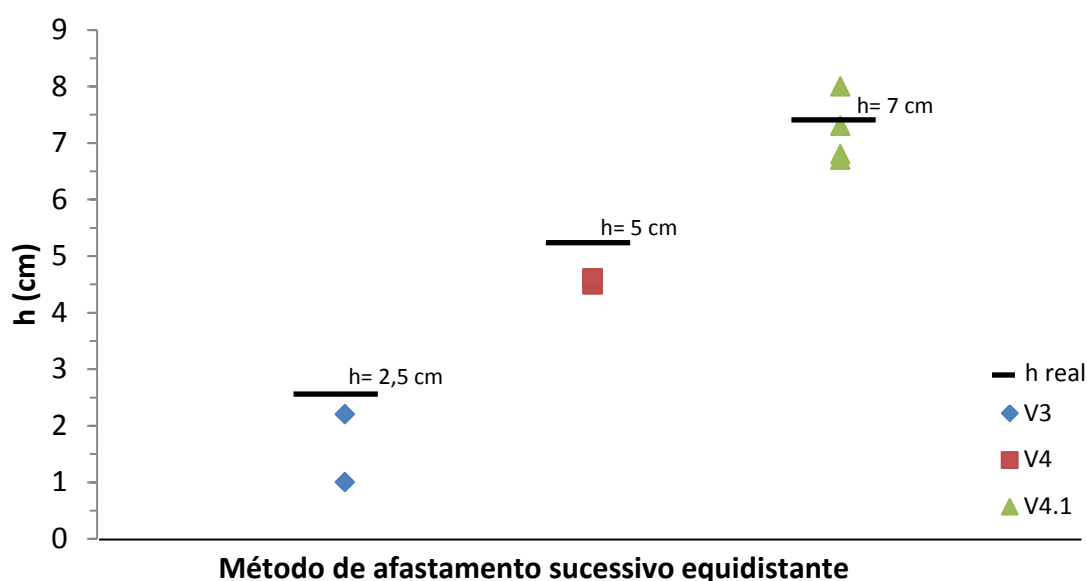


Figura 4.25 - Estimativas da profundidade das fendas obtidas com o método de afastamento sucessivo equidistante

Tabela 4.21 - Estimativa da profundidade de fendas, localizadas a 20 cm da extremidade do provete, usando o método de afastamento sucessivo linear (MPMP), e valor do erro percentual

| Provetes | Estimativa da Profundidade pelo método Pinto, Medeiros e Padaratz (cm) | | | | | | | | |
|---------------|--|----------|----------|----------|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | Fenda a 20 cm da extremidade | | | | Profundidade Real (cm) | Erro (%) | | | |
| | Alinh. 1 | Alinh. 2 | Alinh. 3 | Alinh. 4 | | Alinh. 1 | Alinh. 2 | Alinh. 3 | Alinh. 4 |
| V1 (24 kHz) | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| V2 (24 kHz) | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| V3 (24 kHz) | - | - | 1,1 | - | 5 | - | - | -78 | - |
| V4 (24 kHz) | 1,0 | - | 4,2 | 2,5 | 2,5 | -61 | - | 66 | 1 |
| V3.1 (24 kHz) | 5,5 | 5,1 | 4,9 | 5,3 | 7 | -21 | -28 | -30 | -25 |
| V3.1 (54 kHz) | 7,7 | 7,9 | 5,7 | 7,0 | 7 | 11 | 13 | -20 | 0 |
| V4.1 (24 kHz) | 1,0 | - | 4,2 | 2,5 | 2,5 | -61 | - | 66 | 1 |
| V4.1 (54 kHz) | 3,0 | 3,5 | - | 1,4 | 2,5 | 19 | 39 | - | -43 |

A análise da Tabela 4.21 permite verificar que este método apresenta estimativas de profundidade de fendas com erros superiores a 20 % na maioria dos casos, com exceção de alguns valores do alinhamento 4. Neste método verifica-se que as estimativas obtidas com os transdutores de 54 kHz são mais precisas que as obtidas com os transdutores de 24kHz. Na Figura 4.26 é visível o desvio das estimativas da profundidade real da fenda.

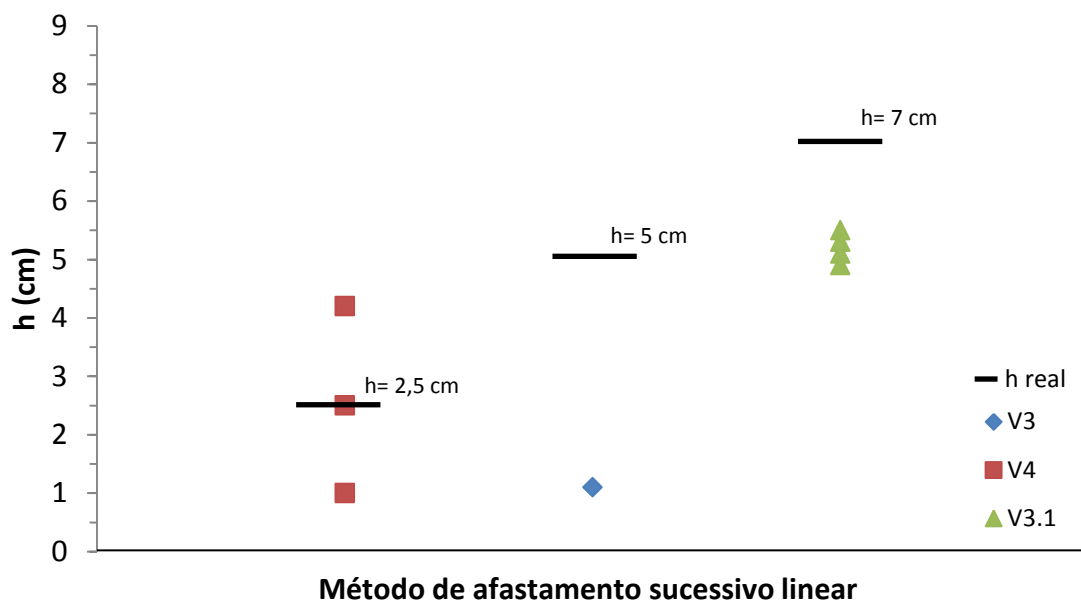


Figura 4.26 - Estimativas da profundidade das fendas obtidas com o método de afastamento sucessivo linear

4.7 Conclusões do capítulo experimental

Os ensaios de propagação de ondas ultrassónicas efetuados em quatro provetes de betão simples permitiram caraterizar o betão constituinte dos provetes quanto à sua homogeneidade, identificar a presença de defeitos, estimar o módulo de elasticidade e estimar a profundidade de fendas.

Recorrendo a ensaios de propagação direta de ondas P foi feita a análise da homogeneidade do betão dos provetes, tendo-se verificado que as velocidades variaram entre 3306 m/s e 4445 m/s. Os valores médios estavam compreendidos entre 3661 m/s e 4369 m/s, e o valor do coeficiente de variação foi, em todos os provetes, inferior a 3,1 %. Concluiu-se, como esperado, que o betão de todos os provetes é homogéneo.

Para a caraterização dos provetes foram efetuadas 1760 leituras diretas e semi-diretas, na direção perpendicular à direção das fendas e na direção das fendas. Os valores de velocidade obtidos foram representados graficamente, através de gráficos de isolinhas de velocidade, para

as leituras diretas, e através da representação de linhas coloridas com a trajetória em linha reta entre transdutores, em que cada cor de linha corresponde a uma gama de velocidades de propagação, para as leituras semi-diretas. Verificou-se que em dois dos provetes (V1 e V2) a presença das fendas é bem evidenciada na representação das velocidades de propagação, com os gráficos de isolinhas. A representação gráfica das leituras cruzadas permite verificar a presença das fendas, pois as velocidades de propagação são menos elevadas quando a fenda intersecta o trajeto teórico linear.

O módulo de elasticidade de cada provete foi determinado experimentalmente recorrendo a ensaios de compressão e a ensaios de propagação de ondas P (neste caso trata-se do módulo dinâmico), e os resultados foram comparados entre si. Verificou-se que em dois dos provetes (V1 e V2) os resultados obtidos são muito próximos. Para os outros dois provetes (V3 e V4) os resultados obtidos foram cerca de 1,3 e 1,4 vezes superiores aos obtidos pelos ensaios de compressão. Sabe-se que se em ensaios lentos ou dinâmicos forem induzidos níveis semelhantes de deformação as diferenças observadas nos módulos medidos assumirão valores marginais. Assim, a diferença nos valores determinados é explicável pela imposição de diferentes níveis de deformação no momento da medição e por limitações experimentais do ensaio de compressão.

Os provetes V1 e V2 dispunham de duas fendas cada um, dispostas na mesma face de cada provete. Nos provetes V3 e V4 foram induzidas duas fendas em faces opostas de cada um dos provetes, em posições criteriosamente escolhidas, uma no centro da face do provete e outra a 20 cm de uma das extremidades do provete. As profundidades das fendas foram estimadas recorrendo a 5 métodos diferentes. Para cada fenda foram considerados quatro alinhamentos. Na estimativa de profundidades de fendas foram obtidos, de uma maneira global, melhores resultados para os provetes V3 e V4. Estes valores foram de encontro ao esperado, pois houve um maior número de leituras e a localização das fendas no provete, criteriosamente escolhida, permitiu que as malhas definidas se adaptassem melhor aos métodos.

O método de Bungey revelou ser eficiente para as fendas de 5 e 7 cm. Nas fendas de 2,5 cm obtiveram-se erros na ordem dos 30 %. Este é o método mais expedito de cálculo, permitindo uma análise rápida.

O Método T foi o método que conduziu a estimativas mais precisas, incluindo a fenda de 2,5 cm, mas já não a de 2 cm. No modo A de disposição dos transdutores, em que o transdutor-emissor fica fixo na extremidade do provete mais afastada da fenda, obtiveram-se valores de erro mais homogêneos mas com valores maiores (entre os 5% e 24%). No modo B de disposição dos

transdutores obtiveram-se valores de erro mais baixos. No entanto observaram-se maiores dispersões no erro (entre os 1 % e 47%).

O Método L, por ser uma simplificação do Método T, conduziu a valores de erro mais elevados do que o Método T. No entanto, apresenta, para três dos alinhamentos, melhores estimativas de profundidade para a fenda de 2 cm. Apesar de ser uma versão simplificada do Método T, a dificuldade do tratamento de resultados é bastante semelhante.

O método sugerido por Pinto, Medeiros e Padaratz apresenta globalmente valores aceitáveis para as fendas centrais. Os resultados não são tão bons no método de afastamento sucessivo linear aplicado a fendas situadas apenas a 20 cm da extremidade do provete. Neste método verificou-se que em alguns alinhamentos não foi possível obter uma estimativa da profundidade da fenda pois as retas de regressão linear originam uma ordenada na origem positiva, o que poderá ser uma limitação à utilização deste método.

Dada a dimensão dos provetes, a frequência dos transdutores pode ter influência nos resultados dos ensaios de ultrassons. Verificou-se, da comparação entre os resultados obtidos com transdutores com frequências de 24 kHz e 54 kHz, que não existem diferenças significativas nos resultados obtidos. As pequenas diferenças de valores existentes não permitem tirar conclusões, pois também podem resultar de erros experimentais, como, por exemplo, menor ou maior pressão na colocação dos transdutores. Observa-se no método de Pinto, Medeiros e Padaratz, que os transdutores de 54 kHz minimizam os erros das leituras, que por sua vez dão origem às regressões lineares com declives positivos. Isto deve-se ao facto de os transdutores de 54 kHz serem mais propícios a leituras de curtas distâncias.

Segundo este estudo, os métodos que apresentaram melhor confiança nos resultados são o método de Bungey e o método de afastamento sucessivo equidistante proposto por Pinto Medeiros e Padaratz. No entanto verifica-se que o Método T e o Método L apresentam maior sensibilidade para fendas com profundidade inferior ou igual a 2,5 cm.

Os ensaios efetuados permitiram verificar que as diferenças nos resultados quando se usam transdutores de 24 kHz e de 54 kHz são pequenas. Uma ressalva importante é a de se ter concluído que estas frequências são pouco adequadas para as distâncias envolvidas. Para estes provetes de pequenas dimensões, teria sido interessante a utilização de transdutores com uma frequência mais elevada, próxima dos 200 kHz. No entanto, tal não foi possível por não se dispor de transdutores dessa frequência. A utilização de transdutores de frequência mais elevada teria permitido uma maior sensibilidade na deteção de defeitos. A utilização desses transdutores também se justificaria, atendendo à dimensão dos provetes, à dimensão das fendas, e às distâncias de propagação das ondas.

5 MODELAÇÃO NUMÉRICA DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÓNICAS

Devido ao facto de o betão ser um material heterogéneo, a propagação das ondas ultrassónicas não se processa obrigatoriamente segundo trajetórias lineares. Conforme abordado nos capítulos anteriores os métodos utilizados para determinação da profundidade de fendas assumem, por simplificação, que o percurso percorrido pela frente de onda ultrassónica é linear. Neste capítulo pretende-se construir um modelo numérico para caraterizar de uma maneira mais fidedigna o percurso da frente de onda dos ultrassons, e dessa forma compreender melhor os erros experimentais analisados nos capítulos anteriores e contribuir para a calibração desses métodos e para o reforço da capacidade interpretativa dos resultados dos ensaios.

5.1 Programa de Modelação Numérica

Para a modelação numérica da propagação de ondas ultrassónicas utilizou-se o software **SimSonic (2D)** baseado no cálculo de diferenças finitas no domínio de tempo (FDTD) cuja computação tem por base as equações da elastodinâmica linear. Este software foi desenvolvido pelo Dr. Emmanuel Bossy em 2003 no decorrer dos seus trabalhos de Doutoramento [33] e é disponibilizado gratuitamente para trabalhos de investigação e para atividades ligadas ao ensino. O SimSonic permite modelar a propagação linear de ondas em meios líquidos e sólidos, inclusive anisotrópicos ou heterogéneos.

5.1.1 Modelo Numérico de propagação de ondas ultrassónicas

5.1.1.1 Equações do modelo

Apresenta-se de seguida o sistema de equações da Elastodinâmica linear em que o programa SimSonic (2D) se baseia para simular a propagação de ondas [34]:

$$\rho(x) \frac{\partial V_{pi}}{\partial t}(x, t) = \sum_{j=1}^{d_e} \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j}(x, t) + f_{pi}(x, t); \quad i, j = 1, 2 \quad 5.1$$

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial t}(x, t) = \sum_{j=1}^{d_e} \sum_{i=1}^{d_e} C_{ijkl}(x) \frac{\partial V_{pk}}{\partial x_l}(x, t) + \theta_{ij}(x, t); \quad i, j = 1, 2 \quad 5.2$$

As variáveis presentes nesta equação são o vetor de posição, num espaço de dimensão geométrica d_e e o tempo. No caso em estudo, d_e toma o valor dois (2D). $C(x)$ é o tensor de rigidez elástica linear de quarta ordem do material e $\rho(x)$ é a massa volúmica do material. Estas características definem o material constituinte do meio de propagação. $V_{pi}(x,t)$ são as componentes do campo vetorial velocidade das partículas e T_{ij} são as componentes do tensor de tensão $\mathbb{T}(x,t)$ de tensão de Cauchy. Por último f_{pi} são as componentes do vetor das forças volúmicas e θ_{ij} são as componentes do tensor das extensões. As equações 5.1 e 5.2 descrevem a propagação das ondas mecânicas em meio contínuo segundo a lei generalizada de Hooke.

5.1.1.2 Discretização do modelo

O software SimSonic (2D), como já foi referido, é um programa de diferenças finitas que consiste na resolução de equações diferenciais pela aproximação das derivadas parciais de uma função contínua através da seguinte equação, válida para a derivada de primeira ordem:

$$\frac{df}{da} \approx \frac{f\left(a + \frac{\Delta a}{2}\right) - f\left(a - \frac{\Delta a}{2}\right)}{\Delta a} \quad 5.3$$

Substituindo a equação 5.3 no sistema de equações diferenciais representados nas equações 5.1 e 5.2 obtêm-se as equações das aproximações de cálculo realizado pelo software [34]. Nesta aproximação há que considerar as derivadas parciais em ordem ao tempo e à posição.

Malha temporal

O modelo numérico é discretizado no tempo por um passo Δt que controla o avanço temporal de cálculo, usado na aproximação das derivadas em ordem ao tempo no sistema de equações 5.1 e 5.2. Esta discretização define uma malha temporal uni-dimensional. Os cálculos de todas as componentes de velocidade são realizados simultaneamente, o mesmo sucedendo com os cálculos das tensões. No entanto, os cálculos das velocidades e das tensões são desfasados entre si, intercalando-se mutuamente no tempo, de acordo com o algoritmo de “Leapfrog” (Figura 5.1) sendo as condições iniciais definidas em $t=0$ para a velocidade e em $t=\Delta t/2$ para as tensões. O SimSonic (2D) no seu primeiro cálculo de velocidade para $t=\Delta t$ usa os valores de velocidade inicial em $t=0$ e os valores da tensão inicial em $t=\Delta t/2$.

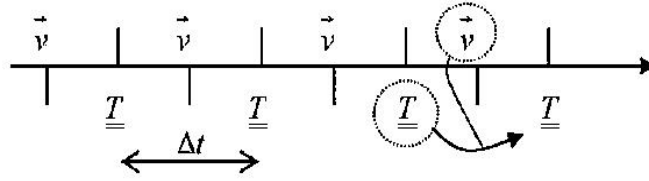


Figura 5.1 - Algoritmo de "Leapfrog" numa malha temporal do SimSonic (2D) [34]

Malha espacial

O espaço é discretizado com um passo Δx para ambas as direções espaciais da malha bidimensional (direções 1 e 2). A organização espacial das várias componentes calculadas pelo SimSonic (2D) está representada na Figura 5.2. Nela, as componentes dizem respeito a um mesmo instante na malha temporal.

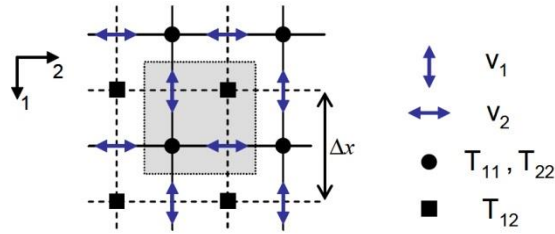


Figura 5.2 - Componentes de cálculo numa malha espacial [34]

Condições de estabilidade

Os valores de Δx e Δt devem ser suficientemente pequenos de modo a que se obtenha uma adequada precisão nos cálculos, garantindo-se assim, automaticamente, a estabilidade. O esforço de cálculo cresce muito rapidamente com a diminuição de Δx e Δt , pelo que se impõe conhecer um limite superior para estes parâmetros de avanço do cálculo, o qual garanta a estabilidade do algoritmo. Dada a interdependência das duas malhas, esse limite é estabelecido conjuntamente através da condição (CFL – Courant, Friedrichs and Levy conditions) de estabilidade, que obedece à seguinte expressão:

$$\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{d_e}} \times \frac{\Delta x}{c_{max}} \quad 5.4$$

na qual c_{max} é a velocidade máxima de propagação da onda P de entre todos os materiais presentes na simulação.

5.1.1.1 Condições de fronteira

O SimSonic permite a simulação em meios infinitos, ou seja, um meio sem qualquer fronteira na sua envolvente. Permite também a simulação em meios confinados, com fronteiras nos limites do mesmo. No caso da propagação em meios confinados, o SimSonic permite a definição de quatro tipos de fronteira:

- i) fronteira de bordo livre em que os valores de todas as componentes de tensão são nulos e os deslocamentos não são impedidos.
- ii) fronteira de bordo fixo na qual os deslocamentos são impedidos e, por isso, nulos.
- iii) fronteira simétrica ao meio de propagação, em que os valores de tensão e deslocamento são simétricos relativamente à fronteira, ou seja o valor no interior da fronteira a uma certa distância desta é igual ao seu homólogo no exterior da fronteira à mesma distância.
- iv) fronteira antissimétrica ao meio de propagação, em que os valores de tensão e deslocamento são antissimétricos relativamente à fronteira, ou seja o valor no interior da fronteira a uma certa distância desta é de sentido contrário ao do seu homólogo no exterior da fronteira à mesma distância.

5.1.1.2 Geração de onda ultrassónica

Para a simulação da geração de ondas ultrassónicas o programa SimSonic2D permite ao utilizador escolher os pontos da malha espacial e da malha temporal correspondentes ao início da perturbação causadora da propagação de ondas ultrassónicas. Estas podem ser geradas de duas formas alternativas:

- i) os deslocamentos dos pontos de origem são forçados a tomar valores introduzidos pelo utilizador, permitindo assim a geração pontual de uma onda com características conhecidas;
- ii) nos pontos de origem são introduzidos valores iniciais das componentes do vector das forças volúmicas f_{pi} e das componentes do tensor das extensões θ_{ij} , após o que o programa calcula o valor das tensões e velocidade das partículas em todos os outros pontos da malha através da discretização das equações 5.1 e 5.2 com os valores das condições iniciais introduzidos.

5.1.2 Funcionamento do Software

O programa SimSonic (2D) consiste num único ficheiro binário executável que utiliza ficheiros de entrada, criados pelo utilizador, e gera ficheiros de saída com os resultados da simulação [34]. Os ficheiros de entrada contêm as informações sobre:

- i) a geometria do domínio em estudo;
- ii) as condições de fronteira;
- iii) o sinal emitido (tipo de sinal e localização dos pontos emissores);
- iv) os materiais que constituem o domínio da simulação;
- v) os passos de cálculo no espaço e no tempo;
- vi) os sinais recebidos (tipo de sinal e localização dos recetores).

Os ficheiros de saída contêm os resultados da simulação do programa. Podem assumir a forma de séries numéricas temporais ou sequências (snapshots) referentes a uma dada resposta, por exemplo componentes de deslocamento ou velocidade, ou ainda elementos do tensor de tensão.

5.2 Modelação numérica de um provete de betão

Para esta modelação numérica apenas foi escolhido um dos provetes ensaiados (proвете V4 / V4.1). A escolha deve-se ao facto deste provete se apresentar com melhores condições, nomeadamente quanto à homogeneidade e à compacidade (velocidade de propagação mais elevada), e a localização e geometria das fendas permitirem a utilização de todos os métodos apresentados para o cálculo de profundidade de fendas.

Neste capítulo apresenta-se a modelação numérica do provete V4. Os resultados dos ensaios de propagação de ondas ultrassónicas deste provete encontram-se no capítulo 4. Pretende-se comparar os resultados da modelação com os resultados obtidos nos ensaios de ultrassons, quer na análise das velocidades de propagação direta, quer na verificação dos métodos de cálculo de profundidade de fendas.

Na Figura 5.3 representa-se a geometria do meio de propagação, bem como a condição de fronteira considerada. O sistema de unidades utilizado está representado na Tabela 5.1. Este

sistema de unidades é o sugerido no manual do SimSonic, e foi escolhido para ser possível definir a frequência do sinal em kHz.



Figura 5.3 - Dimensões da malha de simulação e condições de fronteiras consideradas

Tabela 5.1 - Sistema de unidades utilizado na simulação [34]

| Sistema base | | | Unidades secundárias do sistema base | | | | | |
|--------------|-------|-------|--------------------------------------|------------------|-------------------|------------|-------|-------------|
| distância | tempo | massa | tensão | massa volúmica | velocidade | frequência | força | viscosidade |
| m | ms | ton | GPa | $t \cdot m^{-3}$ | $m \cdot ms^{-1}$ | kHz | GN | MPI |

Considera-se a presença de uma fenda como uma interface entre o provete de betão e um vazio que geralmente se encontra preenchido por ar. Esta interface foi modelada considerando uma diferença acentuada na impedância entre o betão e o ar. O programa SimSonic não permite a modelação do módulo de elasticidade do ar nem a sua densidade. Assim, a fenda foi modelada com estes parâmetros tão baixos quanto possível, para não existir propagação das ondas ultrassónicas ao longo desta interface. Os parâmetros considerados na simulação do betão do provete V4 e da fenda encontram-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Parâmetros adotados na simulação do provete V4 e da fenda

| | ρ (ton/m ³) | ν | C_{11} (GPa) | C_{22} (GPa) | C_{12} (GPa) | C_{66} (GPa) |
|-------------------|------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Provete V4 | 2,333 | 0,21 | 39,6 | 39,6 | 8,32 | 15,64 |
| Fenda | 1 | 1 | 10^{-6} | 10^{-6} | 10^{-6} | 10^{-6} |

A função que define o sinal emitido simulado na modelação numérica tem a forma de uma curva gaussiana definida na expressão 5.5, onde f_c representa a frequência central do sinal, 24 kHz, e S_v representa o desvio padrão, em tempo, da curva de Gauss. O sinal foi definido no programa matlab pela função **gauspuls** com $f_c=24$ e $bw=15$ (bw é a largura de banda). Na Figura 5.4 está representada a forma do sinal emitido introduzido na simulação do SimSonic.

$$Gauspuls = e^{\frac{t^2}{2Sv^2}} \times \cos(2\pi f_c t) \quad 5.5$$

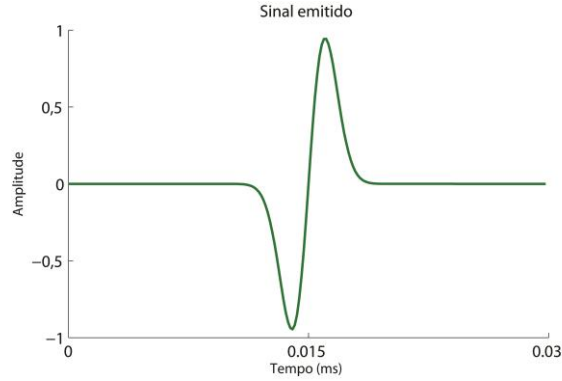


Figura 5.4 - Sinal emitido introduzido no SimSonic

O valor teórico da velocidade de propagação da onda ultrassónica num meio com os parâmetros do provete V4 foi determinado conforme a equação 5.6 (aplicando a equação 2.7) e o valor teórico da velocidade de propagação da onda transversal conforme a equação 5.7.

$$c_L = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \sqrt{\frac{(1 - \nu_d)}{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}} = \sqrt{\frac{(1 - 0,21) \times 39,6}{(1 + 0,21) \times (1 - 2 \times 0,21) \times 2,333}} = 4371 \text{ m/s} \quad 5.6$$

$$c_S = \sqrt{\frac{E_d}{2(1 + \nu)\rho}} = \sqrt{\frac{39,6}{2(1 + 0,21) \times 2,333}} = 2648 \text{ m/s} \quad 5.7$$

A estas velocidades de propagação correspondem, à frequência de 24 kHz, os comprimentos de onda calculados através da equação 3.1:

$$c_L = 4371 \text{ m/s} \quad \lambda_p = \frac{4371}{24} = 182 \text{ mm}$$

$$c_S = 2648 \text{ m/s} \quad \lambda_s = \frac{2648}{24} = 110 \text{ mm}$$

Para a simulação das condições de ensaio foram definidas as condições de fronteira de “bordo livre” em toda a envolvente do provete, uma vez que se considerou serem estas as condições de ensaio.

Os parâmetros da simulação definidos no SimSonic (2D) são apresentados na Tabela 5.3 correspondendo a um total de 1286 passos temporais e a uma malha espacial de 120 000 elementos.

Tabela 5.3 - Parâmetros principais da simulação

| | |
|---------------------------|----------------------|
| Δx (mm) | 1 |
| Δt (ms) | $1,4 \times 10^{-4}$ |
| Duração da simulação (ms) | 0,18 |
| c_{max} (km/s) | 6 |

5.3 Critérios de determinação dos tempos de propagação

No SimSonic (2D) são analisados os sinais emissor e recetor recorrendo a uma representação gráfica da variação da amplitude com o tempo. Deste modo, após identificação dos instantes relevantes de emissão e de receção é possível calcular o tempo de propagação desde o emissor ao recetor, assimilado ao tempo de propagação (Figura 5.5).

A análise dos sinais emitidos e recebidos são uma problemática a ter em conta, pois o resultado pretendido, o tempo de propagação da onda ultrassónica, depende do critério utilizado para identificar os instantes de emissão e de receção. Este problema deriva do facto da onda emitida não ser instantânea – isto é, ter duração finita – e de a onda recebida não ter exatamente a mesma forma temporal da onda emitida, sofrendo ao longo do seu percurso alterações na sua amplitude espectral e na sua duração. Desta forma, os instantes relevantes de emissão e de receção não se situarão em posições homólogas na respetiva onda.

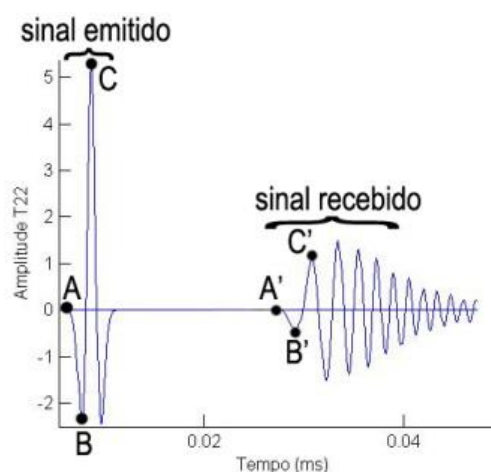


Figura 5.5 - Sinal emitido, sinal recebido e legenda dos critérios utilizados no cálculo do tempo de propagação (adaptado de Viggiani [35])

Neste subcapítulo apresentam-se três critérios utilizados para o cálculo do tempo de propagação das ondas ultrassônicas, na análise dos seus sinais.

Critério de detecção visual da primeira perturbação da onda (CDVPP), este é o critério mais comum [36]: consiste na detecção da primeira perturbação na amplitude. Este método está representado na Figura 5.5 pelos pontos A-A'. De modo a evitar eventuais erros do utilizador na detecção visual da primeira perturbação, definiu-se como critério numérico de identificação da primeira perturbação a relação entre amplitude instantânea e a amplitude (máxima) do sinal exceder 0,005 %. Este critério permite ter em consideração a precisão finita do cálculo do sinal e a amplitude máxima do sinal emitido.

Critério de detecção visual do primeiro pico de amplitude (CPAI), o qual consiste na detecção visual do primeiro pico de amplitude. Este método está representado na Figura 5.5 pelos pontos B-B'.

Critério de detecção visual do segundo pico de amplitude (CPAII), este método consiste na detecção visual do segundo pico de amplitude. Este método está representado na Figura 5.5 pelos pontos C-C'.

Os métodos visuais descritos podem não ser muito precisos pois estão sujeitos à qualidade do sinal emitido e do sinal recebido, são suscetíveis ao rigor do utilizador e suscetíveis à ocorrência de dispersão espectral e atenuação do sinal recebido em relação ao emitido.

De modo a testar estes critérios foi simulado, no SimSonic (2D), o provete V4 sem a presença de fendas e comparados os valores teóricos de velocidade de propagação, calculados a partir da equação 2.7, com os registados pelo tratamento dos sinais do SimSonic (2D). Também se procedeu à comparação com os tempos de propagação obtidos no ensaio experimental ao provete V4, comparando apenas as leituras efetuadas nas zonas centrais, livres da influência da fenda. A simulação foi realizada com quatro emissores e quatro recetores, combinados entre si de modo a serem obtidas leituras diretas e leituras semi-diretas (Figura 5.6), à semelhança do que foi realizado nos ensaios de ultrassons para os provetes de betão.

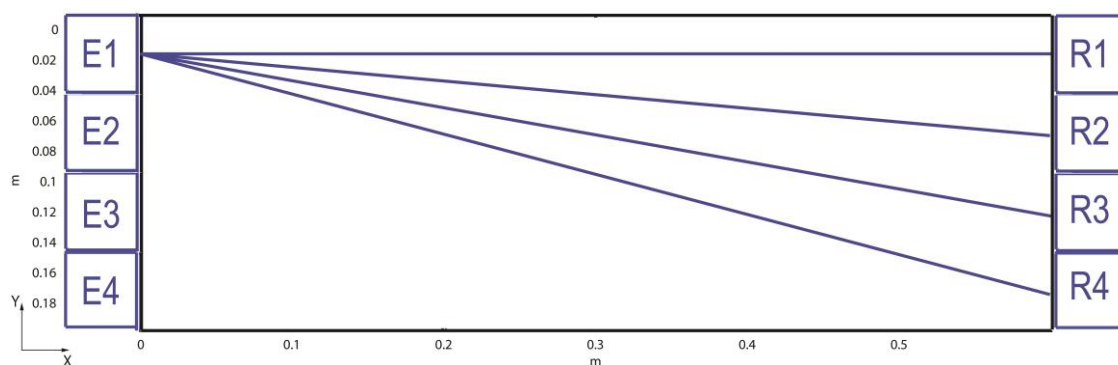


Figura 5.6 – Esquema da simulação para leituras de tempos de propagação sem fendas no provete V4

Apresentam-se de seguida as tabelas com os tempos de propagação obtidos na simulação do SimSonic com os respetivos critérios de cálculo do tempo de propagação (Tabelas 5.4, 5.6 e 5.8): os números a verde correspondem às velocidades em que o emissor se encontra exatamente em frente ao recetor. Apresentam-se também tabelas com o valor das velocidades de propagação, admitindo os diferentes critérios de determinação do tempo de propagação (Tabelas 5.5, 5.7 e 5.9). Como a simulação numérica corresponde à propagação bidimensional plana, e considerando a influência das condições de fronteira na propagação das ondas ultrassónicas, foram considerados duas zonas distintas do provete para comparar com o modelo bidimensional da simulação. A zona correspondente aos alinhamentos 1 e 4 do provete tridimensional designou-se por **Zona Lateral**, e a zona correspondente aos alinhamentos 2 e 3 do provete designou-se por **Zona Central**, como ilustrado na figura seguinte:

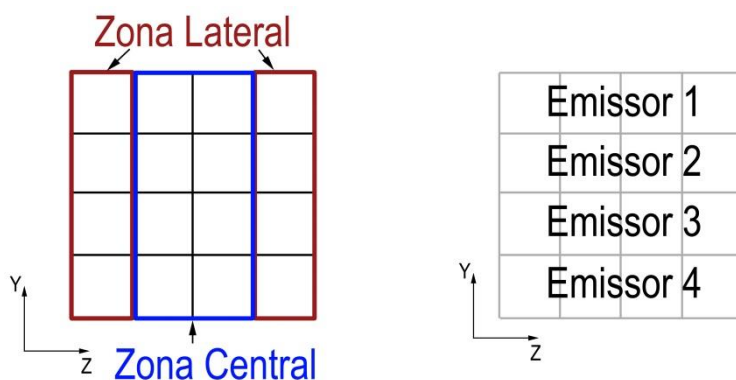


Figura 5.7 - Divisão dos alinhamentos do modelo tridimensional em zonas de comparação com o modelo bidimensional

Considera-se que a simulação realizada pelo SimSonic corresponde a um corte longitudinal (na direção x) no meio da Zona Central do provete. Os valores experimentais utilizados na comparação com a simulação numérica correspondem a uma média dos dois alinhamentos que constituem a Zona Central.

Tabela 5.4 - Tempos de propagação obtidos pelo SimSonic considerando o critério de detecção visual da primeira perturbação da onda

| Critério de detecção visual da primeira perturbação da onda CDVPP (Tempo de propagação μ s) | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|--|---|
| | Emissor 1 | Emissor 2 | Emissor 3 | Emissor 4 | Tempo de propagação médio, obtido experimentalmente, da zona sem fenda (Emissor 3, Zona Central) | Desvio no tempo de propagação Emissor 3 (%) |
| R1 | 142,7 | 142,9 | 143,7 | 145,3 | 139,2 | 3% |
| R2 | 142,9 | 142,8 | 143,0 | 143,7 | 137,8 | 4% |
| R3 | 143,7 | 143,0 | 142,8 | 142,9 | 137,7 | 4% |
| R4 | 145,3 | 143,7 | 142,9 | 142,7 | 138,7 | 3% |

Tabela 5.5 - Velocidades de propagação obtidas pelo SimSonic considerando o critério de detecção visual da primeira perturbação da onda

| Critério de detecção visual da primeira perturbação da onda CDVPP (Velocidade de Propagação km/s) | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|
| | Emissor 1 | Emissor 2 | Emissor 3 | Emissor 4 | Velocidade teórica |
| R1 | 4,205 | 4,213 | 4,232 | 4,258 | 4,371 |
| R2 | 4,213 | 4,201 | 4,209 | 4,232 | |
| R3 | 4,233 | 4,209 | 4,201 | 4,213 | |
| R4 | 4,256 | 4,232 | 4,213 | 4,205 | |

Tabela 5.6 - Tempos de propagação obtidos pelo SimSonic considerando o critério de detecção visual do primeiro pico de amplitude

| Critério de detecção visual do primeiro pico de amplitude CPAI (Tempo de Propagação μ s) | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|--|---|
| | Emissor 1 | Emissor 2 | Emissor 3 | Emissor 4 | Tempo de propagação médio, obtido experimentalmente, da zona sem fenda (Emissor 3, Zona Central) | Desvio no tempo de propagação Emissor 3 (%) |
| R1 | 143,9 | 144,2 | 145,1 | 147,0 | 139,2 | 4% |
| R2 | 144,2 | 143,7 | 144,1 | 145,3 | 137,8 | 5% |
| R3 | 145,3 | 144,1 | 143,7 | 144,2 | 137,7 | 4% |
| R4 | 147,0 | 145,3 | 144,2 | 143,9 | 138,7 | 4% |

Tabela 5.7 - Velocidades de propagação obtidas pelo SimSonic, considerando o critério de detecção visual do primeiro pico de amplitude

| Critério de detecção visual do primeiro pico de amplitude CPAI (Velocidade de Propagação km/s) | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|
| | Emissor 1 | Emissor 2 | Emissor 3 | Emissor 4 | Velocidade teórica |
| R1 | 4,171 | 4,175 | 4,191 | 4,207 | 4,371 |
| R2 | 4,175 | 4,174 | 4,178 | 4,188 | |
| R3 | 4,188 | 4,178 | 4,174 | 4,175 | |
| R4 | 4,207 | 4,188 | 4,175 | 4,171 | |

Tabela 5.8 - Tempos de propagação obtidos pelo SimSonic, considerando o critério de detecção do segundo pico de amplitude

| Critério de detecção visual do segundo pico de amplitude CPAII (Tempo de Propagação μ s) | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|--|---|
| | Emissor 1 | Emissor 2 | Emissor 3 | Emissor 4 | Tempo de propagação médio, obtido experimentalmente, na zona sem fenda (Emissor 3, Zona Central) | Desvio no tempo de propagação Emissor 3 (%) |
| R1 | 144,6 | 144,9 | 146,0 | 147,8 | 139,2 | 5% |
| R2 | 144,9 | 144,4 | 144,8 | 146,0 | 137,8 | 5% |
| R3 | 146,0 | 144,8 | 144,4 | 144,9 | 137,7 | 5% |
| R4 | 147,8 | 146,0 | 144,9 | 144,6 | 138,7 | 4% |

Tabela 5.9 - Velocidades de propagação obtidas pelo SimSonic, considerando o critério de detecção do segundo pico de amplitude

| Critério de detecção visual do segundo pico de amplitude CPAII (Tempo de Propagação km/s) | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|
| | Emissor 1 | Emissor 2 | Emissor 3 | Emissor 4 | Velocidade teórica |
| R1 | 4,149 | 4,155 | 4,167 | 4,184 | 4,371 |
| R2 | 4,155 | 4,154 | 4,158 | 4,167 | |
| R3 | 4,166 | 4,158 | 4,154 | 4,155 | |
| R4 | 4,184 | 4,167 | 4,155 | 4,151 | |

Da análise das Tabelas 5.4, 5.6 e 5.8 conclui-se que o critério cujos resultados melhor aproximam os tempos de propagação reais é o da detecção visual da primeira perturbação (**CDVPP**) causada pela onda. Este critério apresenta valores de desvio na ordem dos 3 a 4 %. O desvio do critério de detecção visual do primeiro pico de amplitude (**CPAI**) apresenta valores de desvio absoluto entre 4 e 5%, o que também acontece com o critério de detecção visual do segundo pico (**CPAII**). As diferenças observadas consoante o critério poderão ser explicadas com a ocorrência de expansão do sinal recebido em relação ao emitido, ou seja, o sinal emitido tem uma duração inferior à duração do sinal recebido. Esse fenómeno implica que a diferença entre as zonas idênticas do sinal emitido e do sinal recebido não correspondem ao tempo de propagação real da onda. Assim, quanto mais longe do início da perturbação for o ponto de referência maior será o desvio nos tempos de propagação. Esta constatação está de acordo com o fenómeno de dispersão da onda, o qual corresponde a que ondas (componentes de onda) de diferentes frequências apresentem velocidades aparentes de fase distintas e por conseguinte, tempos de propagação distintos.

Da análise das Tabelas 5.5, 5.7 e 5.9 conclui-se, como esperado, que o critério que melhor aproxima o valor teórico de velocidade de propagação é o **CDVPP**. Este critério será o utilizado para a análise das restantes simulações.

Apresentam-se na figura seguinte as representações sequenciais criadas pelo SimSonic da propagação de uma onda gerada no emissor 3 no provete V4, considerando a inexistência de

fendas. A cada imagem corresponde um tempo de propagação escolhido de modo a ilustrar melhor a propagação da onda. Para $t=0,015\text{ ms}$ é possível identificar a frente de onda gerada por um transdutor com 50 mm de diâmetro. Para $t=0,110\text{ ms}$ é possível identificar diversas ondas que seguem atrás da frente de onda com direções oblíquas à direção inicial de propagação. Estas ondas nascem da reflexão da onda principal nas fronteiras superior e inferior. Denota-se a perda de intensidade da frente de onda ao longo da propagação.

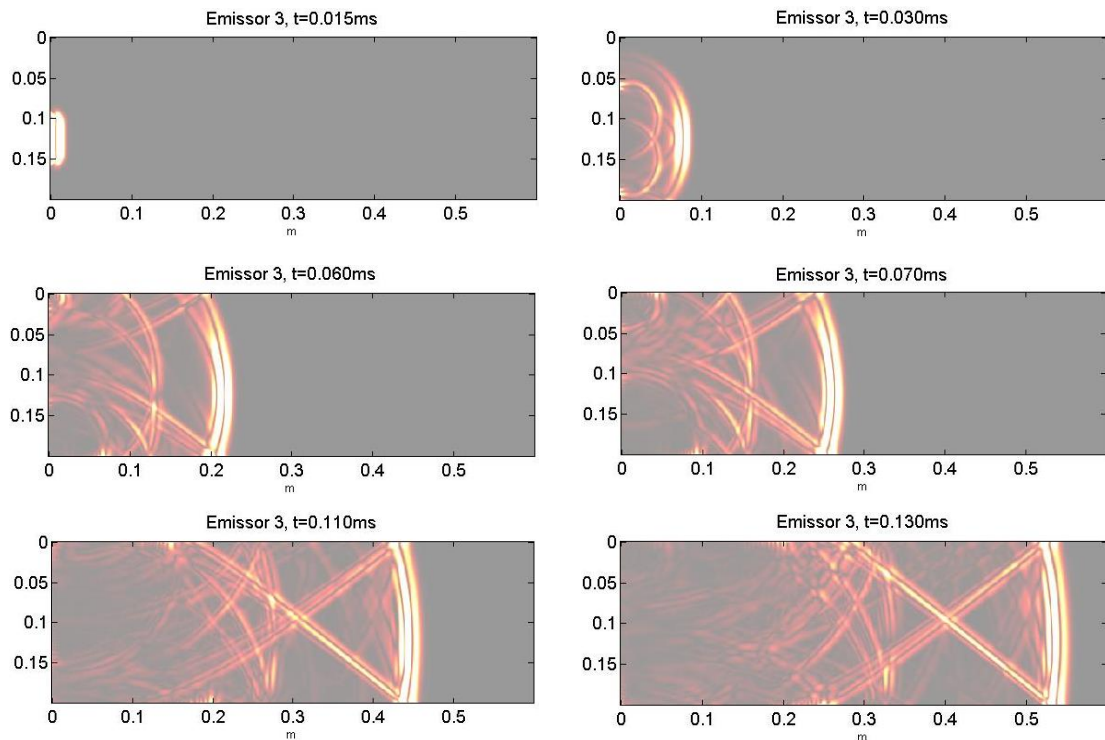


Figura 5.8 – Representação da propagação T22 gerada no emissor 3, na simulação do provete V4 sem a presença das fendas

5.4 Simulação das leituras diretas do provete V4 e comparação com os resultados experimentais

Para a simulação do provete V4 foram consideradas as fendas (Figura 5.9), simuladas com os parâmetros definidos na Tabela 5.2. Foi repetida a simulação das leituras diretas apresentada no subcapítulo 5.3 e os resultados foram comparados com as leituras experimentais.

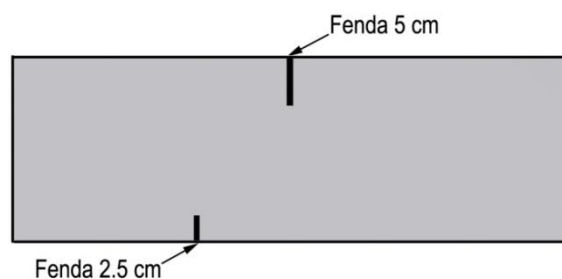


Figura 5.9 - Meio de simulação do provete V4 com as respetivas fendas

Na Figura 5.10 estão representados o sinal emitido e recebido para a leitura do emissor 3 para o recetor 3, no SimSonic, e a ilustração da determinação do tempo de propagação correspondente.

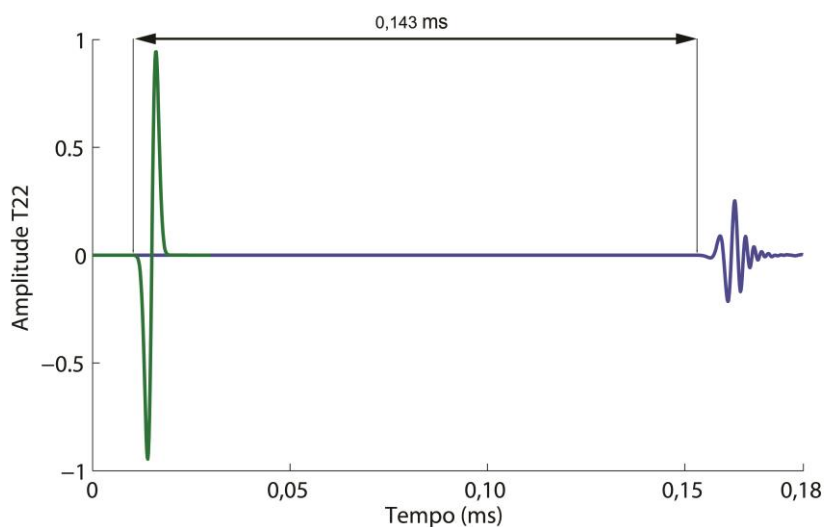


Figura 5.10 - Registo do sinal emitido e do sinal recebido na leitura direta entre o emissor 3 e o recetor 3 do provete V4

Na Tabela 5.10 e na Tabela 5.11 apresenta-se a comparação entre os tempos de propagação obtidos pelo SimSonic e os obtidos nos ensaios experimentais. É apresentado também o desvio entre os dois valores de cada simulação.

Tabela 5.10 - Tempos de propagação da simulação numérica e das leituras experimentais dos ensaios de ultrassons no provete V4

| | Propagação com fendas (provet V4) | | | | | | | |
|----|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|---|-----------|-----------|-----------|
| | CDVPP (Tempo de Propagação μ s) | | | | Valores experimentais (Tempo de Propagação μ s) | | | |
| | Emissor 1 | Emissor 2 | Emissor 3 | Emissor 4 | Emissor 1 | Emissor 2 | Emissor 3 | Emissor 4 |
| R1 | 142,9 | 142,9 | 143,7 | 145,4 | 137,7 | 137,8 | 139,2 | 141,1 |
| R2 | 142,9 | 142,8 | 143,0 | 143,7 | 136,8 | 136,7 | 137,8 | 139,5 |
| R3 | 143,7 | 143,0 | 142,8 | 142,9 | 137,95 | 137,5 | 137,7 | 138,1 |
| R4 | 145,4 | 143,7 | 142,9 | 142,7 | 139,5 | 139,4 | 138,7 | 138,6 |

Tabela 5.11 – Desvio relativo entre os valores na simulação e os valores experimentais para o provete V4

| | Desvio (%) Simulação – Valor experimental | | | |
|----|---|-----------|-----------|-----------|
| | Emissor 1 | Emissor 2 | Emissor 3 | Emissor 4 |
| R1 | 3,8 | 3,8 | 3,3 | 3,0 |
| R2 | 4,5 | 4,5 | 3,8 | 3,1 |
| R3 | 4,2 | 4,1 | 3,7 | 3,5 |
| R4 | 4,2 | 3,2 | 3,1 | 3,0 |

Da análise da Tabela 5.10 e da Tabela 5.11 verifica-se que os valores do desvio relativo entre os resultados numéricos e as leituras experimentais se situam entre os 3 e 5%. Estes valores de desvio encontram-se na ordem de grandeza do desvio atribuído ao critério de determinação dos tempos de propagação discutido no capítulo anterior.

Na Figura 5.11 está representada a propagação da onda gerada no emissor 1, colocado exatamente na linha horizontal que intersesta a fenda superior de 5 cm. Para $t=0,085$ ms é visível a reflexão total da onda quando esta encontra a fenda. É visível, também para o mesmo tempo de propagação, que existe uma parte da onda que se transmite em torno da fenda, e retoma o caminho da onda original mas com menor intensidade.

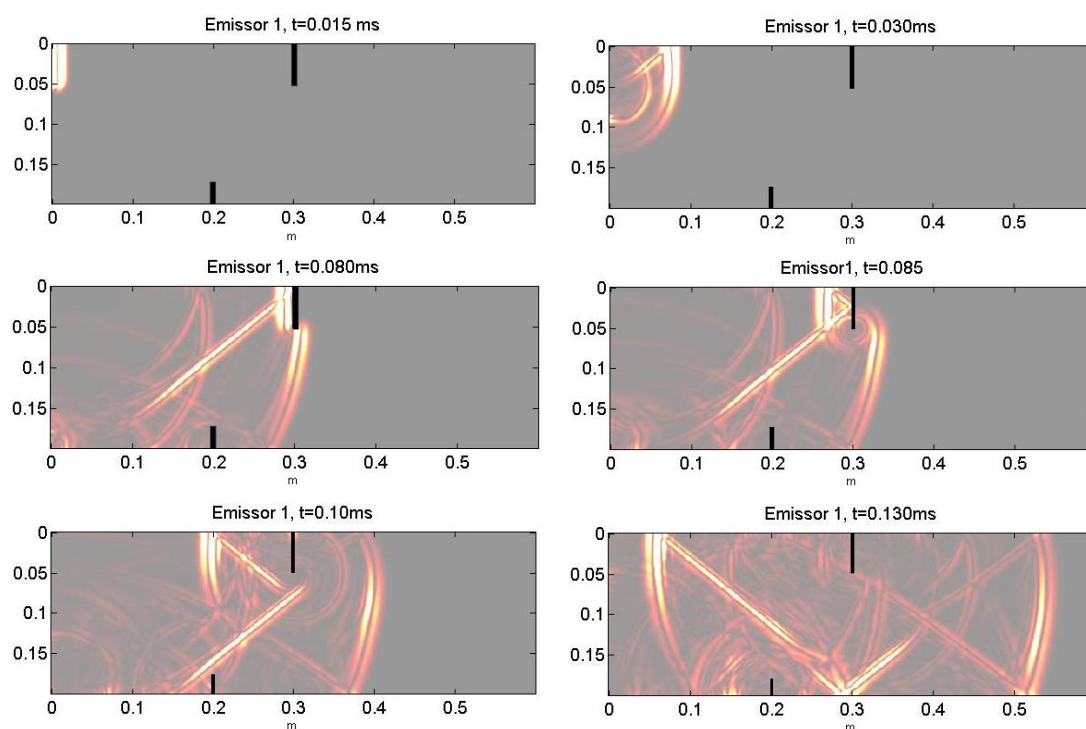


Figura 5.11 – Representação da propagação T22 gerada no emissor 1, na simulação do provete V4

Na Figura 5.12 está representada a propagação da onda gerada pelo emissor 4, colocado em frente à fenda inferior de 2,5 cm. É visível para $t=0,058$ ms a interseção da onda com a fenda,

provocando uma reflexão total da parte da onda que contacta a fenda. No entanto, outra parte da onda passa pela fenda sem sofrer perturbações aparentes, justificando o facto de as fendas com profundidade menor do que o diâmetro dos transdutores não introduzirem alterações aparentes nos tempos de propagação. Foi também simulado o provete V4.1 com a fenda de 7 cm. Os resultados da simulação apresentam-se na Tabela 5.12, 5.13 e na Figura 5.13. Neste caso o diâmetro do transdutor (5 cm) é inferior à profundidade da fenda (7cm).

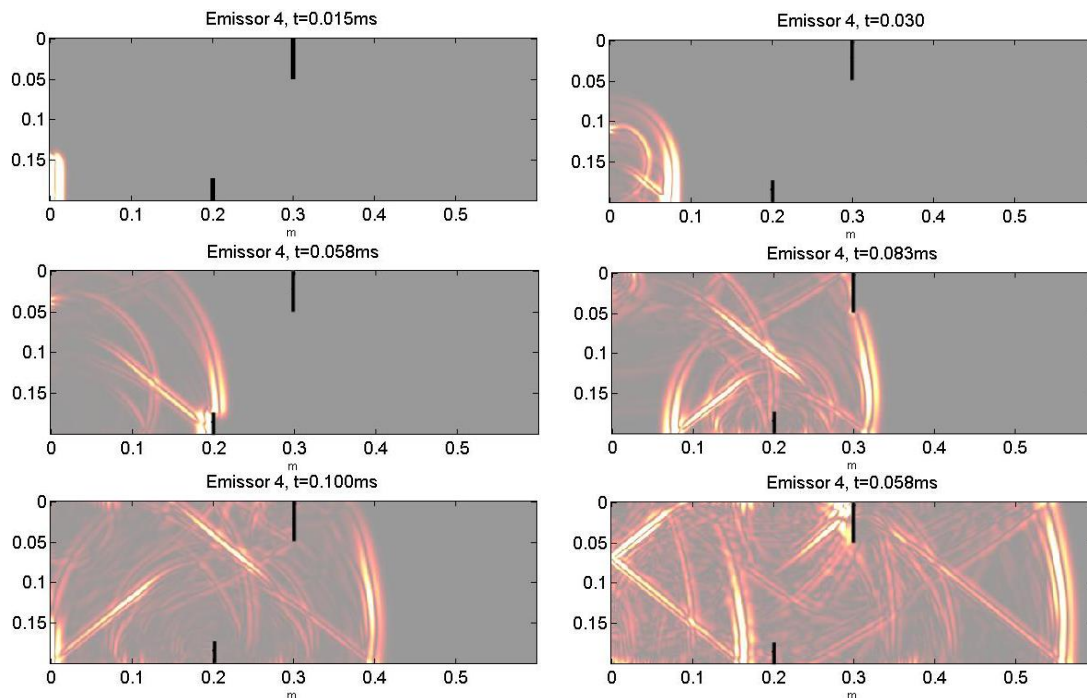


Figura 5.12 - Representação da propagação T22 gerada no emissor 4, na simulação do provete V4

Analisando a Tabela 5.12 e a Tabela 5.13, verifica-se que os valores do desvio relativo entre os tempos experimentais e os tempos obtidos por meio da simulação numérica variam igualmente entre 3 e 4%, à semelhança do caso do provete V4. É visível um ligeiro aumento ($0,7 \mu s$) dos tempos de propagação para as leituras na zona da fenda de 7 cm. Na Figura 5.13 é visível a frente de onda contornando a fenda de 7 cm. Verifica-se que neste caso há um aumento no tempo de propagação quando comparado com o obtido na situação em que a fenda tem 2,5 cm (Figura 5.12).

Tabela 5.12 - Tempos de propagação da simulação numérica e das leituras experimentais dos ensaios de ultrassons no provete V4.1

| | Propagação com fendas provete V4.1 | | | | | | | |
|----|--|-----------|-----------|-----------|--|-----------|-----------|-----------|
| | CDVPP (Tempo de Propagação μ s) | | | | Valores experimentais (Tempo de Propagação μ s) | | | |
| | Emissor 1 | Emissor 2 | Emissor 3 | Emissor 4 | Emissor 1 | Emissor 2 | Emissor 3 | Emissor 4 |
| R1 | 143,6 | 143,2 | 143,7 | 145,4 | 139,65 | 138,8 | 139,6 | 141,8 |
| R2 | 143,2 | 142,8 | 143,0 | 143,9 | 138,45 | 137,2 | 137,8 | 138,9 |
| R3 | 143,7 | 143,0 | 142,8 | 142,9 | 138,65 | 137,6 | 137,9 | 138,4 |
| R4 | 145,3 | 143,7 | 142,9 | 142,7 | 140,35 | 138,8 | 138,8 | 138,4 |

Tabela 5.13 - Desvio relativo entre os valores na simulação e os valores experimentais para o provete V4.1

| | Desvio (%) Simulação – Valor experimental | | | |
|----|---|-----------|-----------|-----------|
| | Emissor 1 | Emissor 2 | Emissor 3 | Emissor 4 |
| R1 | 2,8 | 3,2 | 3,0 | 2,5 |
| R2 | 3,4 | 4,1 | 3,8 | 3,6 |
| R3 | 3,7 | 4,0 | 3,6 | 3,3 |
| R4 | 3,5 | 3,6 | 3,0 | 3,1 |

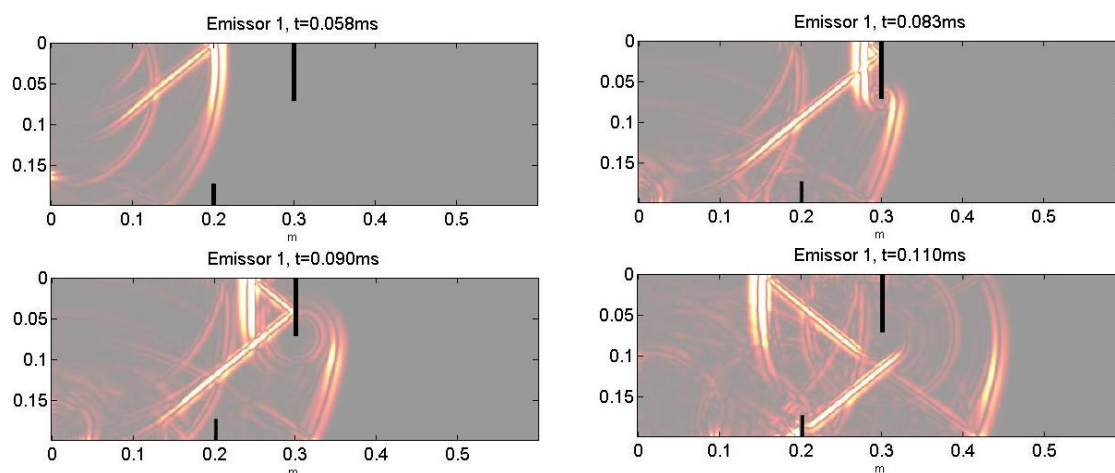


Figura 5.13 - Representação da propagação T22 gerada no emissor 1, na simulação do provete V4.1

5.5 Simulação das leituras indiretas do provete V4 e comparação com os resultados experimentais

Como já referido anteriormente, nas leituras indiretas de propagação das ondas ultrassónicas, ambos os transdutores estão colocados numa mesma face do provete. No caso das leituras indiretas constatou-se que o diâmetro dos transdutores não deve ser desprezado no cálculo da

distância de propagação e, por conseguinte, da velocidade de propagação. Na Figura 5.14 está representada a simulação numérica da propagação de uma onda numa situação de leitura indireta.

É possível observar na simulação (Figura 5.14), que a onda emitida é gerada não apenas no centro do transdutor mas sim em toda a sua dimensão. Da mesma forma, a onda recebida pelo recetor poderá ser detetada em qualquer ponto do mesmo, influenciando assim a distância teórica de propagação que normalmente é definida, nos métodos de cálculo de profundidade de fendas, desde o centro do transdutor emissor até ao centro do transdutor recetor. Com o objetivo de esclarecer a questão de entre que pontos medir a distância de propagação foram simuladas duas propagações em situação de leitura indireta: a primeira com a simulação de transdutores com 5 cm de diâmetro, e a outra simulando transdutores pontuais. Está representada na Figura 5.15 a simulação utilizada para comparar os tempos de propagação simulados no SimSonic por transdutores de 5 cm de diâmetro com os tempos correspondentes à simulação com transdutores pontuais. O transdutor pontual é colocado na posição central do transdutor com 5 cm de diâmetro que lhe corresponde. Na Tabela 5.14 apresentam-se os resultados das simulações.

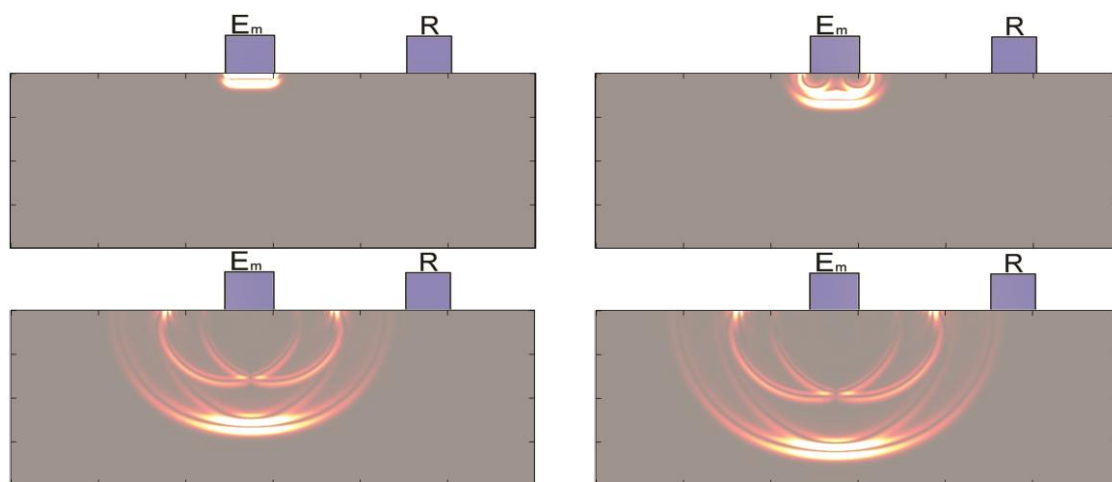


Figura 5.14 – Propagação de ondas ultrassónicas numa leitura indireta

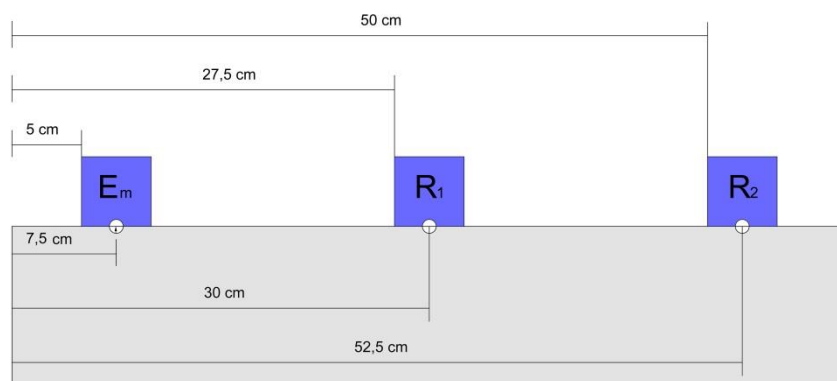


Figura 5.15 - Disposição dos transdutores pontuais e dos transdutores com 5 cm de diâmetro na leitura de propagação indireta

Da análise da Tabela 5.14 verifica-se que os tempos de propagação calculados com os transdutores pontuais são superiores aos tempos de propagação calculados com os transdutores com 5 cm de diâmetro, significando que na verdade a distância percorrida pela onda, para o caso dos transdutores com 5 cm de diâmetro, não pode ser medida do centro do transdutor emissor ao centro do transdutor recetor pois irá gerar um desvio, no sistema em análise, de cerca de 10 μ s. Este desvio de tempo não deve ser desprezado para propagações de pequenas distâncias. Esta análise comparativa entre duas simulações realizadas no SimSonic pode não corresponder à realidade experimental; assim serão comparadas as leituras experimentais com as simulações numéricas indiretas para transdutores pontuais ou de 5 cm de diâmetro, analisando qual dos casos (transdutores pontuais ou com diâmetro de 5 cm) melhor simula os transdutores experimentais.

Tabela 5.14 - Tempos de propagação calculados no SimSonic e velocidades de propagação com a disposição de transdutores da Figura 5.15

| | Transdutor pontual | | | Transdutor de 5 cm | | |
|--------------------------------|--------------------|-------|--------|--------------------|-------|-------|
| | Emissor | R1 | R2 | Emissor | R1 | R2 |
| Posição x inicial (cm) | 7,5 | 30 | 52,5 | 5 | 27,5 | 50 |
| Posição y inicial (cm) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Distância ao emissor (cm) | - | 22,5 | 45 | - | 22,5 | 45 |
| Tempo de propagação (μ s) | - | 54,14 | 107,46 | - | 42,82 | 96,14 |
| Velocidade (km/s) | - | 4,16 | 4,19 | - | 5,25 | 4,68 |

De modo a verificar qual a simulação mais adequada à realidade experimental, fez-se a comparação entre as leituras obtidas experimentalmente, para os tempos sem fenda do método de Bungey, e as leituras simuladas no SimSonic com transdutores com 5 cm de diâmetro e com os transdutores pontuais (Tabela 5.15).

Da Tabela 5.15 é possível observar que os valores do desvio relativo entre as leituras experimentais e os valores calculados pelo SimSonic são inferiores para os transdutores modelados como pontuais. Observa-se também em ambos os casos que o desvio vai diminuindo

à medida que a distância entre o transdutor-emissor e transdutor-recetor vai aumentando. Também se verifica que os tempos de propagação registados para os transdutores pontuais são sempre superiores aos experimentais e que, ao contrário, os tempos de propagação calculados para os transdutores modelados com a dimensão 5 cm são sempre inferiores aos experimentais. Considera-se importante verificar o efeito que estas diferenças podem assumir na estimativa de cálculo da profundidade da fenda de modo a proceder à escolha da melhor modelação numérica dos transdutores a usar nas restantes simulações numéricas.

Tabela 5.15 - Comparação entre os valores experimentais dos tempos sem fenda das leituras indiretas do provete V4 com os valores numéricos obtidos com transdutores pontuais e transdutores com 5 cm de diâmetro

| Leituras Sem fenda com afastamento equidistante | | | | | | |
|---|-------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--|---------------|-------------------|
| Leitura | Distância ao centro do provete (cm) | Leitura experimental (μ s) | Leitura SimSonic (T5cm) (μ s) | Leitura SimSonic (Tpontual) (μ s) | Desvio (T5cm) | Desvio (Tpontual) |
| TSF1 | 5 | 8,3 | 1,1 | 11,7 | -87% | 41% |
| TSF2 | 15 | 31,2 | 25,5 | 35,5 | -18% | 14% |
| TSF3 | 25 | 56,7 | 49,0 | 59,4 | -14% | 5% |
| TSF4 | 35 | 80,7 | 72,8 | 83,4 | -10% | 3% |
| TSF5 | 45 | 104,3 | 95,8 | 107,3 | -8% | 3% |
| TSF6 | 55 | 127,6 | 119,8 | 131,5 | -6% | 3% |

Na Tabela 5.16 apresentam-se as leituras dos tempos de propagação, obtidas no SimSonic, para os transdutores de 5 cm e para os transdutores pontuais, e as leituras obtidas experimentalmente. Apresentam-se igualmente as estimativas de profundidade da fenda recorrendo ao método de Bungey. Apresentam-se também os valores de desvio entre as leituras experimentais e as leituras obtidas pelo SimSonic.

Tabela 5.16 - Comparação entre os valores experimentais dos tempos com fenda das leituras indiretas do provete V4 com os valores numéricos obtidos com transdutores pontuais e transdutores com 5 cm de diâmetro

| Leituras indiretas com a fenda de $h=5$ cm aplicando o afastamento equidistante | | | | | | | Método Bungey fenda de 5 cm (cm) | |
|---|------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--|---------------|-------------------|-------------------------------------|---|
| Leitura | Distância à fenda (cm) | Leitura experimental (μ s) | Leitura SimSonic (T5cm) (μ s) | Leitura SimSonic (Tpontual) (μ s) | Desvio (T5cm) | Desvio (Tpontual) | Estimativa de fenda SimSonic (T5cm) | Estimativa de fenda SimSonic (Tpontual) |
| TCF1 | 5 | 51,45 | 27,1 | 11,7 | -47% | -77% | 59,6 | 5,0 |
| TCF2 | 15 | 40,2 | 36,4 | 35,5 | -9% | -12% | 7,5 | 5,1 |
| TCF3 | 25 | 59,25 | 55,9 | 59,4 | -6% | 0% | 6,6 | 5,2 |
| TCF4 | 35 | 81,75 | 78,9 | 83,4 | -4% | 2% | 6,8 | 5,9 |
| TCF5 | 45 | 103,9 | 100,2 | 107,3 | -4% | 3% | 6,7 | 5,8 |
| TCF6 | 55 | 127,65 | 123,3 | 131,5 | -3% | 3% | 6,1 | 5,9 |

Analisando a Tabela 5.16 verifica-se que os valores do desvio entre os tempos de propagação experimental e os obtidos com os dois transdutores simulados no SimSonic são bastante próximos. No entanto, e ao contrário do verificado na Tabela 5.15, alguns dos resultados para o $T_{pontual}$ são, em módulo, superiores aos valores do T_{5cm} . No entanto, observa-se também que os valores de $T_{pontual}$ fornecem melhores estimativas de profundidade de fenda, justificando assim a diferença em módulo do erro. Considera-se assim que o tipo de transdutores adequados para a simulação numérica e que melhor simulam as condições ensaiadas são os transdutores pontuais ($T_{pontual}$), e, nesse sentido as restantes simulações serão realizadas apenas com este tipo de transdutores.

5.5.1 Apresentação dos resultados do método de Bungey obtidos com a simulação numérica e comparação com os resultados experimentais

Na Tabela 5.17 apresentam-se as comparações entre as estimativas obtidas experimentalmente e obtidas com o SimSonic, para a fenda central (**5 cm**) do provete V4, sendo possível verificar que estes conduzem a estimativas bastante próximas da profundidade real para todas as distâncias entre emissor e recetor, contrariamente ao que se verifica para as leituras experimentais onde apenas nos intervalos definidos por Bungey apresenta resultados próximos da profundidade real da fenda.

Tabela 5.17 - Estimativa de profundidade de fendas obtidas experimentalmente e obtidas pela simulação no SimSonic

| | Experimental Bungey (cm) | SimSonic Bungey ($T_{pontual}$) (cm) |
|-------|--------------------------------|---|
| | - | 5,0 |
| | 6,3 | 5,1 |
| | 3,8 | 5,2 |
| | 3,4 | 5,9 |
| | - | 5,8 |
| | - | 5,9 |
| Média | 4,5 | 5,5 |

5.5.2 Apresentação dos resultados do Método T e Método L obtidos com a simulação numérica e comparação com os resultados experimentais

Na Tabela 5.18 apresentam-se os tempos de propagação experimentais e os obtidos pela simulação no SimSonic para a fenda situada mais próxima de uma das extremidades (2,5 cm) do

provete V4. É possível verificar que o valor do desvio em módulo entre os valores experimentais e os valores obtidos através do SimSonic não ultrapassa os 3 %, com exceção da primeira leitura que atinge os 12%. Na Figura 5.16 é possível verificar que os gráficos destes métodos se sobrepõem, evidenciando a proximidade das leituras experimentais com as leituras obtidas pelo SimSonic. No entanto, os valores de profundidade de fendas obtidos são diferentes nos dois casos. Como se observa na Tabela 5.19, os valores obtidos experimentalmente apresentam uma melhor aproximação ao valor real da fenda ao contrário dos valores obtidos pelo programa de simulação numérica. Considerando que os valores do desvio entre as leituras experimentais e as leituras obtidas pelo SimSonic são bastante baixos, o facto dos gráficos utilizados para determinar a estimativa de profundidade de fendas serem idênticos e o valor da estimativas serem diferentes, conclui-se que os métodos gráficos T e L aplicados às fendas próximas da extremidade do provete são muito sensíveis a pequenas alterações nos tempos de propagação.

Tabela 5.18 - Tempos de propagação obtidos experimentalmente e pelo SimSonic no Método T e Método L

| Distância entre emissor e recetor (cm) | Modo A, Viga 4 (fenda 2,5 cm) | | SimSonic, Modo A (fenda 2,5 cm) | |
|--|-------------------------------|---------------------------|---------------------------------|------------|
| | Numero do recetor | Tempos de Propagação (μs) | Tempos de Propagação (μs) | desvio (%) |
| 10 | R1 | 21,6 | 23,8 | 10 |
| 15 | R2 | 35,3 | 35,8 | 1 |
| 20 | R3 | 46,8 | 47,7 | 2 |
| 25 | R4 | 59,5 | 59,7 | 0 |
| 30 | R5 | 70,9 | 71,8 | 1 |
| 35 | R6 | 81,6 | 83,8 | 3 |
| 40 | R7 | 99,5 | 98,9 | -1 |
| 45 | R8 | 109,4 | 108,7 | -1 |
| 50 | R9 | 119,5 | 120,2 | 1 |
| 55 | R10 | 133,5 | 132,2 | -1 |

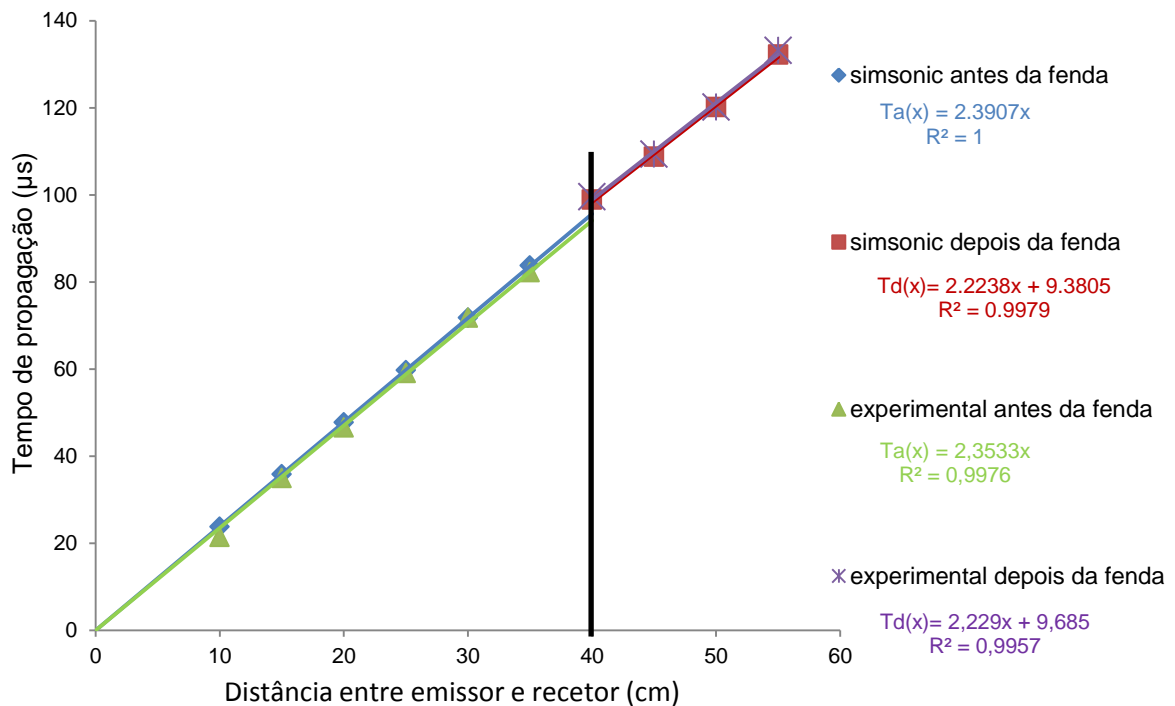


Figura 5.16 – Representação gráfica dos tempos de propagação usados no cálculo da estimativa de profundidade de fenda para o Método T e para o Método L no provete V4, modo A

Tabela 5.19 - Valores de cálculo da estimativa de profundidade da fenda de 2,5 cm do modo A do Método T e Método L

| | SimSonic | Experimental (média alinh.2 e 3) |
|--------------------------------|----------|-------------------------------------|
| Declive $T_a(x)$ | 2,3907 | 2,353 |
| Declive $T_d(x)$ | 2,2238 | 2,229 |
| Ordenada na origem $T_d(x)$ | 9,3805 | 9,685 |
| T1 (μs) | 95,628 | 94,132 |
| T2 (μs) | 97,0798 | 97,913 |
| Método T h(cm) | 1,1 | 2,0 |
| Método L h(cm) | 0,6 | 1,6 |

5.5.3 Apresentação dos resultados do método sugerido por Pinto, Medeiros e Padaratz (MPMP) para a simulação numérica e comparação com os resultados experimentais

Na Tabela 5.20 apresentam-se os resultados experimentais e de simulação numérica com o SimSonic para o método de afastamento sucessivo equidistante, aplicado à fenda central (**5 cm**)

do provete V4. Como já foi referido, apesar das diferenças, entre os tempos de propagação se situarem entre os 4 e 9%, ambas as estimativas de profundidade da fenda são próximas do seu valor real. Na Figura 5.17 representa-se graficamente o método de afastamento sucessivo equidistante, a partir do qual se determinou a estimativa de profundidade da fenda para os valores experimentais e para os valores obtidos pelo SimSonic.

Na Tabela 5.21 apresentam-se os valores registados nas leituras experimentais e nas leituras obtidas pelo SimSonic para o método de afastamento sucessivo linear, aplicado à fenda situada mais próxima da extremidade **(2,5cm)** do provete V4. Ao contrário do método anterior, a diferença entre as leituras experimentais e as leituras obtidas pelo SimSonic apresenta valores de desvio bastante inferiores (até 2,6%). Ambas as estimativas são bastante próximas da profundidade real da fenda. Na Figura 5.18 representam-se graficamente os resultados para a aplicação do método de afastamento sucessivo linear, a partir do qual se determinou a estimativa de profundidade da fenda para os valores experimentais e para os valores obtidos pelo SimSonic.

Tabela 5.20 - Tempos de propagação experimentais e simulados, na aplicação do método de afastamento sucessivo equidistante para a fenda central (5 cm) do provete V4

| | Distância entre emissor e recetor (cm) | Experimental | | | SimSonic | | |
|---------------------|--|--------------|---------------------------|---|------------|---------------------------|---|
| | | Tempo (μs) | Xi^2 (cm ²) | $\frac{\tau i^2}{4}$ (μs ²) | Tempo (μs) | Xi^2 (cm ²) | $\frac{\tau i^2}{4}$ (μs ²) |
| Intervalo de Bungey | 5 | 51,45 | 6,25 | 720,92 | 29,05 | 6,25 | 211,00 |
| | 15 | 40,2 | 56,25 | 412,09 | 43,87 | 56,25 | 481,12 |
| | 25 | 59,25 | 156,25 | 894,01 | 65,10 | 156,25 | 1059,61 |
| | 35 | 81,75 | 306,25 | 1705,69 | 87,62 | 306,25 | 1919,36 |
| | 45 | 103,9 | 506,25 | 2824,92 | 110,37 | 506,25 | 3045,51 |
| | 55 | 127,65 | 756,25 | 4173,16 | 133,94 | 756,25 | 4484,99 |
| <i>h (cm)</i> | | 4,5 | | | 5,4 | | |

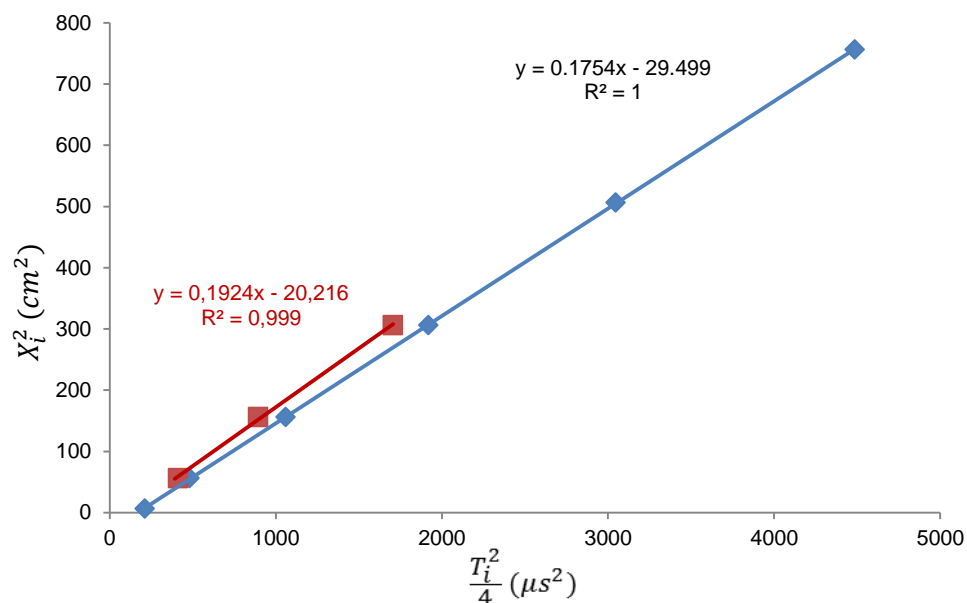


Figura 5.17 - Representação gráfica dos resultados na aplicação do método de afastamento sucessivo equidistante para a fenda central (5 cm) do provete V4

Tabela 5.21 - Tempos de propagação experimentais e simulados na aplicação do método de afastamento sucessivo linear para a fenda de 2,5 cm situada próxima de uma das extremidades do provete V4

| Distância (cm) | Experimental | | | SimSonic | | |
|-------------------|----------------------|---------------------|---|----------------------|---------------------|---|
| | Tempo (μs) | X^2 (cm^2) | $\left(Ti - \frac{t_1}{2}\right)^2$ (μs^2) | Tempo (μs) | X^2 (cm^2) | $\left(Ti - \frac{t_1}{2}\right)^2$ (μs^2) |
| 35 | 83,40 | 306,25 | 1738,89 | 84,59 | 306,25 | 2272,66 |
| 40 | 96,20 | 506,25 | 2970,25 | 96,14 | 506,25 | 3499,08 |
| 45 | 108,00 | 756,25 | 4395,69 | 108,04 | 756,25 | 4969,35 |
| 50 | 120,45 | 1056,25 | 6201,56 | 120,06 | 1056,25 | 6811,90 |
| 55 | 131,45 | 1406,25 | 8055,06 | 132,19 | 1406,25 | 8917,94 |
| h (cm) | 2,2 | | | 1,4 | | |

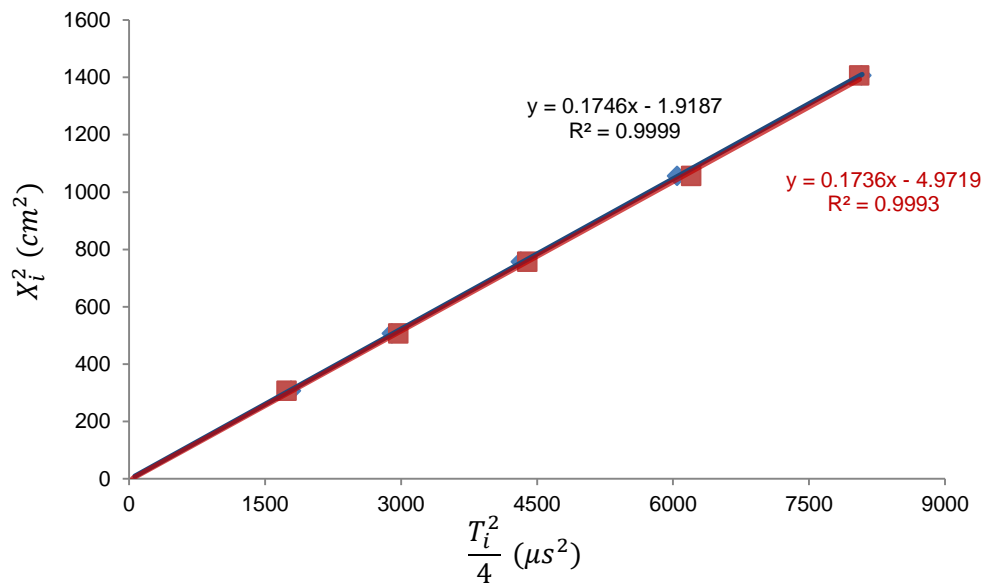


Figura 5.18 - Representação gráfica dos resultados na aplicação do método de afastamento sucessivo linear para a fenda de 2,5 cm situada próxima de uma das extremidades do provete V4

5.5.4 Resumo das estimativas da profundidade de fendas obtidas com o SimSonic

Na Tabela 5.22 estão resumidas as estimativas da profundidade de fenda do provete V4 obtidas pela simulação no SimSonic recorrendo aos métodos de cálculo de profundidade de fendas. Estas estimativas são comparadas com as obtidas experimentalmente.

Analisando a Tabela 5.22 verifica-se que os resultados obtidos pelo SimSonic, para os métodos de Bungey e MPMP, aproximam-se significativamente do valor real da fenda, como registado experimentalmente. No entanto, os valores obtidos pelo SimSonic para o Método T e para o Método L não apresentam boas aproximações dos valores da profundidade da fenda, ao contrário dos resultados obtidos experimentalmente.

Tabela 5.22 – Comparação entre os resultados obtidos pelo SimSonic na estimativa de profundidade de fendas recorrendo aos diversos métodos e comparação com as estimativas obtidas experimentalmente para o provete V4

| | Fenda Central (h=5 cm) | | Fenda a 20 cm da extremidade (h=2.5 cm) | |
|-------------------|---------------------------------------|------------------------|--|------------------------|
| | Experimental (média Al. 2 e Al. 3) | SimSonic (Tpontual) | Experimental (média Al. 2 e Al. 3) | SimSonic (Tpontual) |
| Método Bungey | 4,2 | 5,5 | - | - |
| Método MPMP | 4,5 | 5,4 | 4,2 | 1,4 |
| Método T (modo A) | - | - | 2,0 | 1,1 |
| Método T (modo B) | - | - | 2,0 | 1,0 |
| Método L (modo A) | - | - | 2,0 | 0,6 |
| Método L (modo B) | - | - | 2,5 | 0,6 |

De maneira a verificar estes resultados foram efetuadas novas simulações do provete V4, simulando a fenda central com os valores de $h=2,5$ cm e $h=7$ cm, e a fenda próxima de uma das extremidades do provete com os valores de $h=5$ cm e $h=7$ cm. Apenas para os resultados da fenda central $h=7$ cm foi possível comparar com os resultados experimentais do provete V4.1. Estes resultados apresentam-se na Tabela 5.23 e na Tabela 5.24.

Analisando a Tabela 5.23 e a Tabela 5.24, verifica-se que os métodos aplicados a fendas centrais apresentam estimativas da profundidade de fendas da ordem de grandeza da profundidade real da fenda, mesmo no caso da fenda central com profundidade de $h=2,5$ cm. Para as fendas localizadas a 40 cm da extremidade no caso do modo A e a 20 cm da extremidade no caso do modo B, à semelhança do que foi observado na Tabela 5.22 somente o método de afastamento sucessivo linear apresenta boas estimativas da profundidade de fendas.

Tabela 5.23 - Estimativas de profundidade da fenda central com diferentes profundidades simuladas no SimSonic

| | Fenda Central ($h=7$ cm) | | Fenda Central ($h=2,5$ cm) | |
|----------------------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|
| | Experimental (média Al. 2 e Al. 3) | SimSonic (Tpontual) | Experimental | SimSonic (Tpontual) |
| Método Bungey | 6,8 | 7,6 | - | 2,8 |
| Método MPMP | 7,4 | 7,7 | - | 2,6 |

Tabela 5.24 - Estimativas de profundidade da fenda mais próxima da extremidade do provete V4, simuladas com diferentes profundidades no SimSonic

| | SimSonic (Tpontual) | |
|-------------------------|---|---|
| | Fenda a próxima da extremidade ($h=7$ cm) | Fenda próxima da extremidade ($h=5$ cm) |
| Método MPMP | 7,3 | 5,0 |
| Método T (modoA) | 1,6 | 3,4 |
| Método T (modoB) | 5,1 | 3,1 |
| Método L (modoA) | 3,6 | 2,1 |
| Método L (modoB) | 3,3 | 1,9 |

Na Figura 5.19 à Figura 5.21 estão representadas as estimativas obtidas pelo SimSonic e as respetivas estimativas obtidas experimentalmente apresentadas na Tabela 5.22 à Tabela 5.24.

Da análise da Figura 5.19 da Figura 5.20 e da Figura 5.21 é possível observar que a simulação numérica dos métodos de Bungey e de Pinto Medeiros e Padaratz conduzem a boas estimativas, como já tinha sido referido da análise das tabelas. As estimativas da profundidade de fendas obtidas pelo Método T (Figura 5.22) e pelo Método L (Figura 5.23) afastam-se muito da profundidade real das fendas e também das estimativas obtidas experimentalmente.

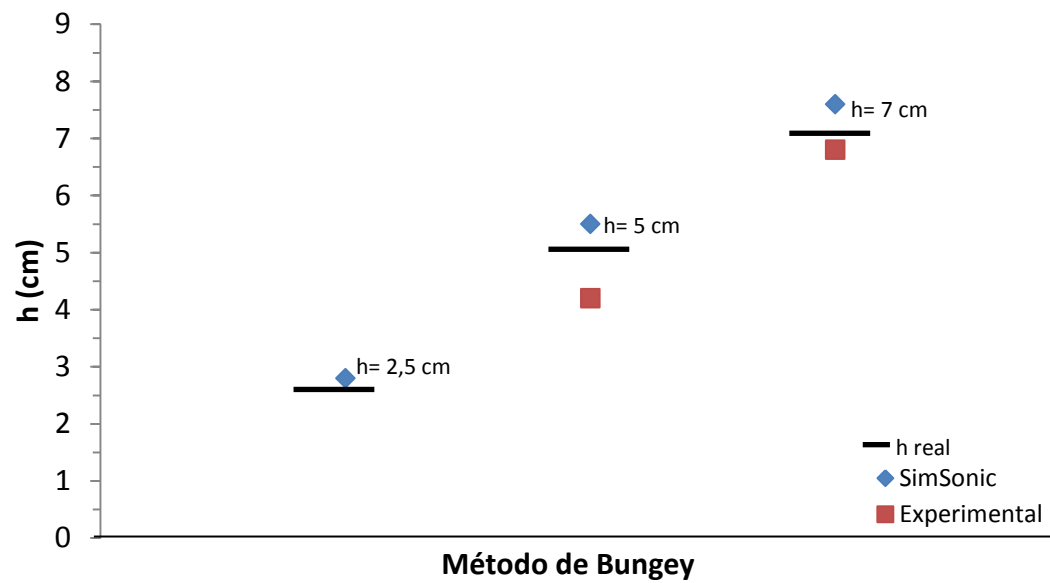


Figura 5.19 - Resumo das estimativas de profundidade de fendas obtidas experimentalmente e obtidas pela simulação no SimSonic com o método de Bungey

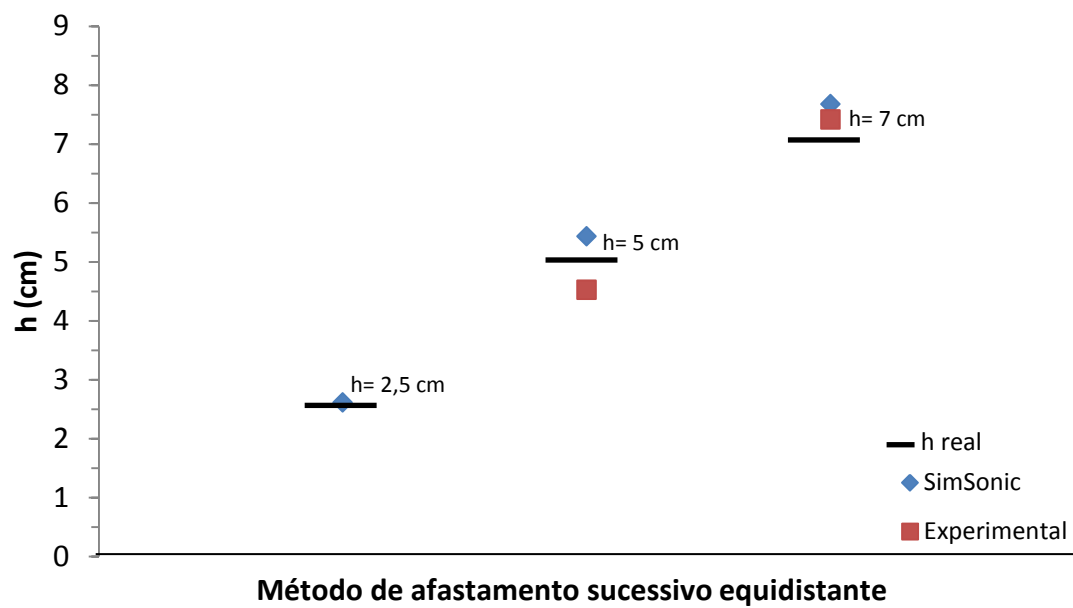


Figura 5.20 - Resumo das estimativas de profundidade de fendas obtidas experimentalmente e obtidas pela simulação no SimSonic com o método de afastamento sucessivo equidistante

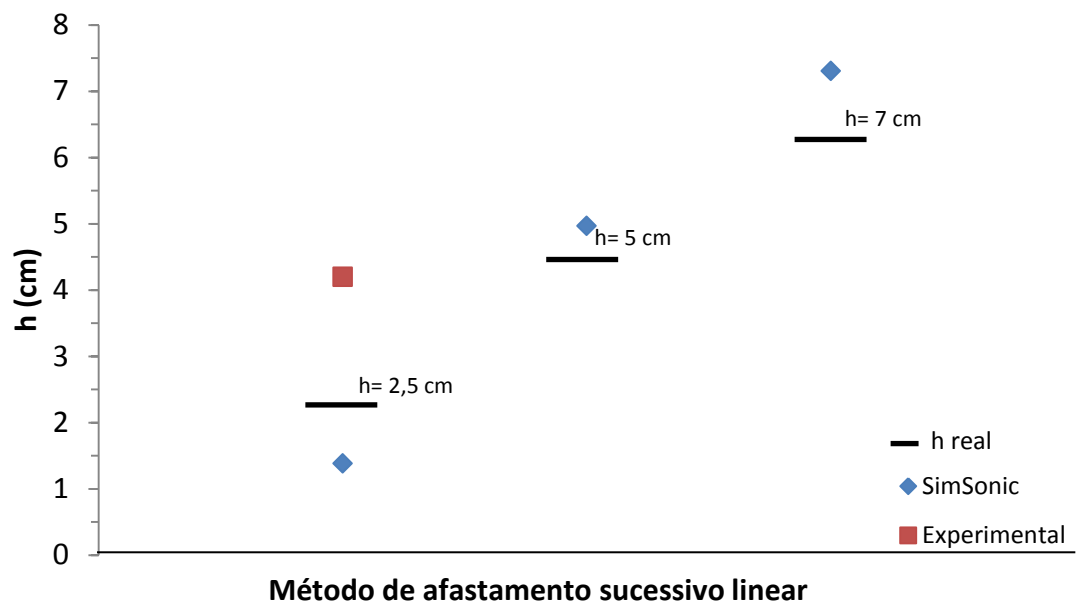


Figura 5.21 - Resumo das estimativas de profundidade de fendas obtidas experimentalmente e obtidas pela simulação no SimSonic com o método de afastamento sucessivo linear

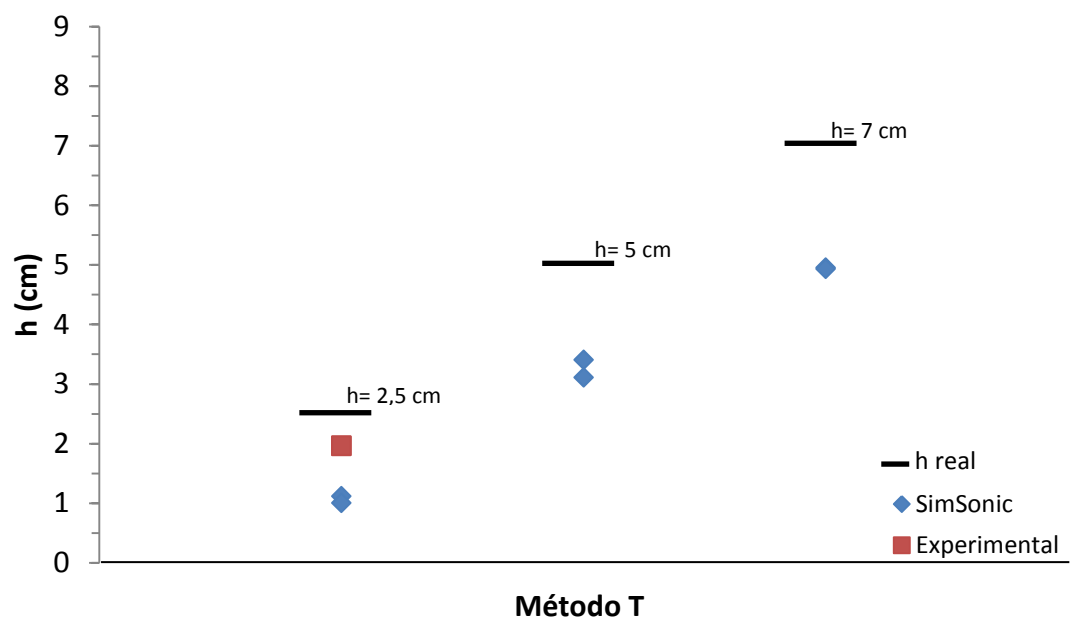


Figura 5.22 - Resumo das estimativas de profundidade de fendas obtidas experimentalmente e obtidas pela simulação no SimSonic com o Método T

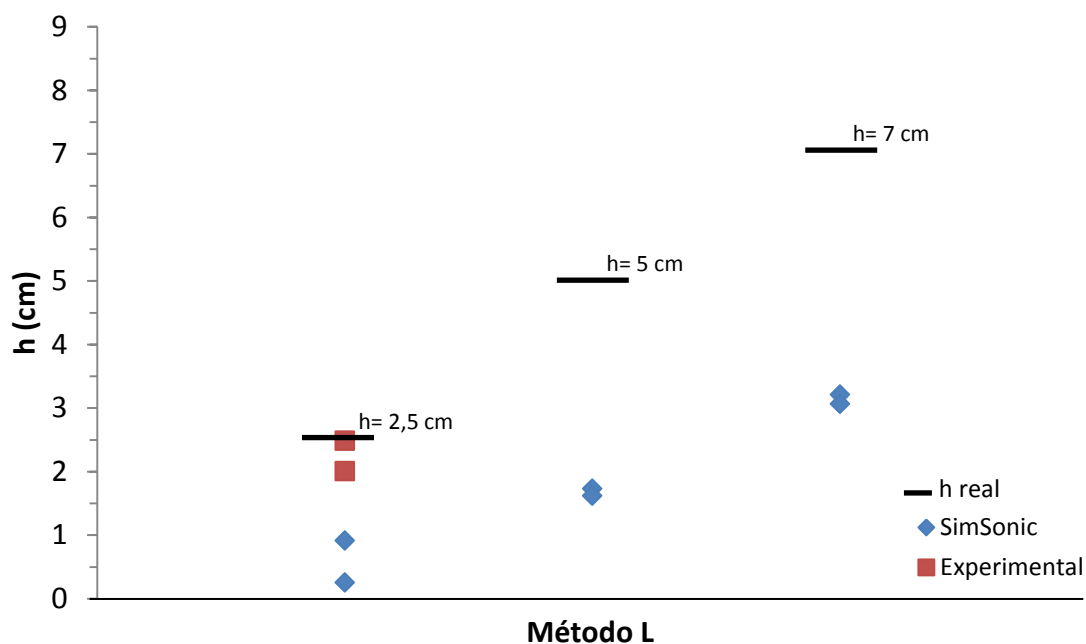


Figura 5.23 - Resumo das estimativas de profundidade de fendas obtidas experimentalmente e obtidas pela simulação no SimSonic com o Método L

5.6 Conclusões do capítulo de modelação numérica

Para a simulação numérica dos ensaios de propagação das ondas ultrassónicas utilizou-se o programa SimSonic (2D), baseado no cálculo de diferenças finitas no domínio de tempo (FDTD) cuja computação tem por base as equações da elastodinâmica linear. Apenas foi simulado o provete V4 / V4.1 por este apresentar os valores mais elevados da velocidade de propagação obtidos experimentalmente.

Para a determinação dos tempos de propagação da simulação dos ensaios foram utilizados três critérios, o critério de deteção visual da primeira perturbação (**CDVPP**), o critério do primeiro pico de amplitude (**CPAI**) e o critério do segundo pico de amplitude (**CPAII**). O critério que melhor aproximou os valores experimentais aos valores numéricos foi o **CDVPP**. Este critério foi utilizado em todos os ensaios de modelação numérica.

Foi realizada a simulação numérica das leituras diretas, e comparadas com a média entre os alinhamentos 2 e 3 das leituras experimentais. Os valores obtidos são bastante semelhantes, com um desvio entre os 2% e 3%, este desvio pode ser atribuído ao critério de determinação do tempo de propagação utilizado.

Foram simuladas também as leituras de propagação indiretas para avaliar a aplicabilidade dos métodos de determinação de profundidade fendas. Foram comparados os tempos de

propagação obtidos pela simulação numérica com os obtidos experimentalmente. Foram também comparadas as estimativas de profundidade de fendas. Verificou-se que as leituras dos tempos de propagação obtidas pelo SimSonic tinham uma diferença de 4-9% com o método de afastamento sucessivo equidistante (método de Bungey e MPMP), e diferença até 4% com o método de afastamento sucessivo linear (Método T, Método L e MPMP). Para os métodos de Bungey e MPMP as estimativas de profundidade de fendas obtidas pelo SimSonic aproximaram-se dos valores da profundidade da fenda. No Método T e Método L as estimativas de profundidade de fendas não estavam próximas da profundidade real. Este facto permite concluir que o Método T e o Método L são bastante sensíveis a alterações nos tempos de propagação, isso poderá levar a desvios nas estimativas de determinação da profundidade de fendas.

Os métodos de Bungey e MPMP conduziram a estimativas bastante próximas para qualquer profundidade de fenda, permitindo validar a eficácia do método. No entanto, verificou-se que quanto maior a profundidade da fenda, menor o erro absoluto da estimativa da sua profundidade.

Considera-se que o método utilizado para a determinação dos tempos de propagação não é o mesmo método utilizado pelo aparelho dos ensaios experimentais (PUNDIT). Estas incertezas podem implicar desvios na modelação numérica que podem ser muito relevantes.

6 CONCLUSÕES

6.1 Aspetos relevantes dos estudos efetuados

As conclusões finais deste trabalho incidem na análise crítica dos ensaios experimentais e numéricos realizados, fazendo-se também considerações sobre a dificuldade na aplicação dos mesmos, sobre a aplicabilidade dos métodos propostos e sobre a comparação entre o experimental e o numérico.

Neste trabalho utilizou-se a análise dos tempos de propagação de ondas ultrassónicas na avaliação da qualidade do betão, na deteção de heterogeneidades e na determinação da profundidade de fendas em provetes de betão. O método de propagação de ondas ultrassónicas revelou-se de fácil aplicação permitindo realizar um elevado número de leituras diminuindo assim o seu erro e aumentando a sua eficácia. No entanto, existem algumas dificuldades na elaboração das medições. O facto de os transdutores serem sensíveis à pressão com que são aplicados na estrutura pode levar a erros experimentais. A quantidade do produto de acoplamento utilizado também é determinante nos bons resultados. Os métodos de isolinhas e de linhas coloridas para o tratamento das leituras diretas permitiram a interpretação rápida e eficaz dos resultados.

É possível estimar a profundidade de fendas em estruturas de betão recorrendo aos ultrassons. No entanto, estas aplicações têm algumas limitações. Neste trabalho foram estudados diferentes métodos de estimativa de profundidade de fendas: (i) Método de Bungey, (ii) Método T, (iii) Método L e (iv) Método de Pinto Medeiros e Padaratz. A escolha das distâncias entre transdutores é um fator importante na análise da profundidade de fendas recorrendo ao método de Bungey e ao método de afastamento sucessivo equidistante sugerido por Pinto, Medeiros e Padaratz. Todos os métodos apresentaram algumas limitações para a determinação de fendas com profundidades pequenas, embora, no Método T e no Método L se tenha conseguido estimar valores aceitáveis nos ensaios experimentais.

O software de modelação numérica, Simsonic(2D), permitiu tirar algumas conclusões relativas aos métodos de determinação da profundidade de fendas. Os métodos de Bungey e o método de afastamento sucessivo equidistante de MPMP foram validados pela modelação numérica, para todas as profundidades de fendas utilizando todas as distâncias entre o transdutor-emissor e o transdutor recetor. O Método T e o Método L revelaram grande sensibilidade às variações das leituras dos tempos de propagação permitindo concluir que são os métodos menos adequados para estimar a profundidade de fendas.

Com os resultados obtidos neste estudo recomendam-se os métodos de Bungey e de Pinto, Medeiros e Padaratz para a determinação da profundidade de fendas, pois apresentaram valores válidos na parte experimental e na modelação numérica.

Globalmente estes métodos de propagação de ondas ultrassónicas têm resultados bastante satisfatórios quando se encontram em condições ideais. São métodos simples e de rápida execução permitindo análise rápida das estruturas. Estes métodos têm um baixo custo de utilização associado. Requerem, no entanto que os seus utilizadores tenham experiência para a constante monitorização dos resultados e, caso haja necessidade, a repetição dos mesmos.

6.2 Recomendação para estudos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros considera-se interessante a verificação da aplicabilidade dos métodos de cálculo de profundidade de fendas apresentados neste trabalho em estruturas já construídas, confrontando os valores obtidos com os observados em carotes extraídas das zonas ensaiadas.

Considera-se interessante verificar a aplicabilidade destes métodos em fendas que contenham armaduras na sua proximidade e/ou o desenvolvimento de novos métodos capazes de estimar a sua profundidade nestas condições.

Relativamente à modelação numérica, seria interessante aperfeiçoar o software utilizado neste trabalho de modo a permitir simular os aparelhos de emissão e de receção de ondas ultrassónicas. Para a análise dos resultados, considera-se importante implementar métodos baseados na análise de Fourier, como por exemplo o da correlação cruzada entre os sinais emitidos e recebidos, para determinação robusta do tempo de propagação de ondas ultrassónicas.

Sugere-se a modelação numérica dos ensaios no espaço tridimensional comparando os seus resultados com os resultados experimentais, alterando também a geometria da fenda de modo a que não seja perpendicular à superfície.

Considera-se também de interesse a utilização do Software de modelação de ensaios de ultrassons para definir a trajetória de propagação das ondas ultrassónicas e a elaboração de um método de cálculo de estimativa da profundidade de fendas que contabilize essas trajetórias. Uma vez que os métodos existentes consideram as trajetórias das ondas ultrassónicas retilíneas, este novo método poderá conduzir a estimativas da profundidade das fendas mais próximas do valor real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ministério Brasileiro dos Transportes, *Manual de inspeção de pontes rodoviárias*. Publicação IPR- 709, Brasil, 2004.
2. International Atomic Energy Agency, *Non-destructive testing for plant life assessment*. Vienna, 2005
3. Contribuidores da Wikipédia, *Som*. 2013, Wikipédia, a enciclopédia livre. URL: <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Som&oldid=35851812>.
4. Medeiros, A., *Aplicação do ultra-som na estimativa da profundidade de fendas superficiais e na avaliação da eficácia de injeções em elementos de concreto armado*. 2007, Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.
5. Ferraro, C.C., *Advanced nondestructive monitoring and evaluation of damage in concrete materials*. 2003, Mestrado em Engenharia, University of Florida.
6. Krautkramer, J. and H. Krautkramer, *Ultrasonic Testing of Materials*. 4th ed. 1990.
7. Bungey, J.H., G.M. Millard, and G.G. Michael, *Ultrasonic pulse velocity methods*, in *Testing of Concrete in Structures*, T.a. Francis, Editor. 2006. p. 40-64.
8. Kramer, S.L., *Wave Propagation*, in *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Editor. 1996. p. 153-183.
9. Serra, J.B., *Dinâmica dos Solos e Engenharia Sísmica. Módulo 1 - Propagação de ondas em meio elástico linear*, in *texto de apoio ao Diploma de Formação Avançada em Geotecnia para Engenharia Civil*. 2010.
10. Costa, A. and J. Appleton, *Estruturas de Betão Armado 1*. 2002, Instituto Superior Técnico.
11. Richart, F.E., R.D. Woods, and J.R. Hall, *Wave Propagation in an elastic, homogeneous, isotropic medium*, in *Vibration of soils and foundations*, Prentice-Hall, Editor. 1970: Englewood Cliffs, New Jersey. p. 60-92.
12. Norma Portuguesa NP EN 12504-4, *Ensaio do betão nas estruturas*,. 2007.
13. Popovics, S., *Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship*. The American Society For NonDestructive Testing (ASNT), 2010.
14. Liang, M.T. and J. Wu, *Theoretical elucidation on the empirical formulae for the ultrasonic testing method for concrete structures*. Cement and Concrete Research, 2002. **32**: p. 1763-1769.

15. Vasconcelos G. Lourenço P.B. Alves C. Pamplona J., *Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites*. Ultrasonics, 2008. **48**: p. 453-466.
16. CNS Farnel, *Ultrasonic Pulse Velocity Testing - Technical Reference Manual*. 2003.
17. Rio, J. and J. Figueiras, *Deteção de dano com ultrasons em elementos de betão estrutural*, in *Encontro Nacional de Betão Estrutural (BE2012)*. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto (FEUP), Portugal, 24-26 de Outubro de 2012.
18. Ryall, M.J., *Bridge Management*. 2001, Boston: Butterworth-Heinemann.
19. Goueygou, M., O. Abraham, and J.-F. Lataste, *A comparative study of two non destructive testing methods to assess near surface mechanical damage in concrete structures*. NDT & E International, 2008. **41**(6): p. 448–456.
20. Ramamoorthy, S.K., Y. Kane, and J.A. Turner, *Ultrasound diffusion for crack depth determination in concrete*. Nebraska Center for Materials and Nanoscience, 2004.
21. Amasaki, S. and T. Akashi, *Measuring methods of the depth of surface cracks in structural concrete by means of ultrasonic pulse technique*. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1981. **3**: p. 113-120.
22. Pinto, R.C.A., et al., *Use of ultrasound to estimate depth of surface opening cracks in concrete structures*. NDT Net, 2007.
23. Andrade, P.B., *Estimativa da profundidade de fendas no concreto através da utilização do Ultra-Som e do Eco-Impacto*. 2007, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
24. P. Antonaci, et al., *Monitoring evolution of compressive damage in concrete with linear and nonlinear ultrasonic methods*. Cement and Concrete Research, 2010. **40**(7): p. 1106–1113.
25. D. G. Aggelis and A.S. Paipetis, *Monitoring of resin curing by ultrasound*. Construction and Building Materials, 2011. **26**(1): p. 755–760.
26. RILEM, *Testing of concrete by the ultrasonic method*, in *NDT*. 1972.
27. Abo-Qudais, S.A., *Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves*. Construction and Building Materials, 2004. **19**: p. 257-263.
28. Chung, H.W. and K.S. Law, *Diagnosis in situ concrete by ultrasonic pulse technique*. Concrete International, 1983.
29. British Standard BS EN12504-4, *Testing Concrete, in Determination of ultrasonic pulse velocity*. 2004.

30. Ferry Borges J., *A utilização dos ultrasons para o estudo das propriedades dos materiais*. 1954, Publicação nº 50, LNEC.
31. PunditLab, *Determination of Poisson's Ratio and the Modulus of Elasticity by measuring with P- and S-wave transducers*. Proceq, 2011.
32. Lee, K.-M., D.-S. Kim, and J.-S. Kim, *Determination of dynamic Young's modulus of concrete at early ages by impact resonant test*. KSCE Journal of Civil Engineering, 1997. **1**(1): p. 11-18.
33. Bossy, E. *Simonic Web Site*. 2004; Available from: www.simsonic.fr.
34. Bossy, E., *User's guide for SimSonic2D*. 2012.
35. Viggiani, G. and J.H. Atkinson, *Interpretation of bender element test*. Géotechnique, 1995. **45**(1): p. 149-154.
36. Chan, C.-M., *Bender element test in soil specimens: indentifying the shear wave arrival time*. Electronical Journal of Geotechnical Engineering, 2010. **15**: p. 1263-1276.